

Авторы:  
Бычков Ю.В.,  
Васильев Д.С.,  
Павлов А.О.

Bychkov Y.V.,  
Vasilyev D.S.,  
Pavlov A.O.

# АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ В РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

## ALGORITHM MODELS IN RELAY PROTECTION

Аннотация: в статье приводится сравнительный анализ имитационных и алгоритмических моделей. Даются примеры использования последних в алгоритмах определения места повреждения и защиты дальнего резервирования, приводятся расчеты алгоритмических моделей, используемых в данных задачах.

Ключевые слова:

имитационное и алгоритмическое моделирование, адекватность модели, определение места повреждения, защита дальнего резервирования.

**Abstract:** Comparative analysis of simulation and algorithm models, examples of use and calculation of the latter in relay protection algorithms, such as fault location and long-range redundancy are given in the article.

**Keywords:** simulation and algorithm models, model adequacy, fault location, long-range redundancy.

### Введение

У современной микропроцессорной релейной защиты (РЗ) есть огромное преимущество перед её предыдущим поколением. Оно заключается в существенном увеличении информационной базы, доступной РЗ, и, что важнее, в способности воспользоваться этим объёмом данных. Кроме того, современная релейная защита владеет моделью защищаемого объекта. В РЗ широко используются два вида моделей: имитационные и алгоритмические. Суть их, а следовательно, и задачи, которые они решают, принципиально различаются.

### Определение и задачи моделирования

#### Имитационная модель

Имитационная модель (ИМО) является математическим описанием рассматриваемого объекта и становится его представлением при разработке, анализе и проверке алгоритмов РЗ. От ИМО требуется получить реакцию на различные коммутации в сети: включение на нагрузку, появление различного рода несимметрии и т.д. Если говорить о линии электропередачи, то имитационная модель позволяет найти токи и напряжения в ЛЭП при известных ЭДС систем по её концам, например, в нормальном и аварийном режимах.

В качестве примера на рис. 1 представлен переход от реального объекта – линии электропередачи – к его ИМО (для простоты приведена однолинейная схема ЛЭП с двухсторонним питанием). Системы слева и справа задаются соответствующими величинами ЭДС  $E_s$ ,  $E_r$  и сопротивлениями  $Z_s$ ,  $Z_r$ , а повреждение – параметрами аварии (координатой места повреждения  $x_f$  и переходным сопротивлением  $R_f$ ). Как видим, результатом моделирования являются величины токов  $I_s$  и напряжений  $U_s$  в месте установки защиты, которые образуют вектор наблюдения  $V_s$

$$V_s = [U_s \quad I_s].$$

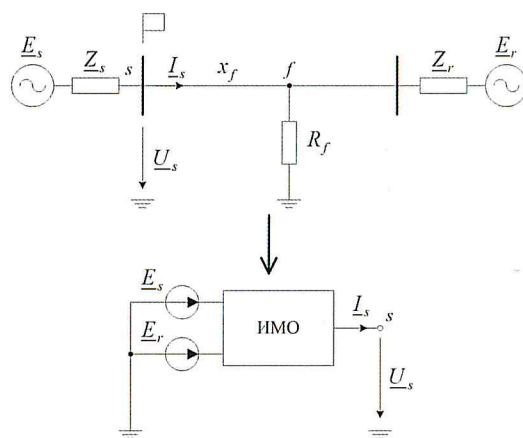


Рис. 1. Имитационная модель линии электропередачи

### Алгоритмическая модель

Наиболее точным определением алгоритмической модели (АМО) является слово «наблюдатель». Имея математическую модель объекта и вектор наблюдения  $V_s$ , который может быть получен как устройством, установленным на объекте, так и ИМО данного объекта, АМО оценивает электрические величины  $I_f$  и  $U_f$  в месте предполагаемого повреждения  $f$  [1], как показано на рис. 2. Алгоритмическая модель, таким образом, представляет собой некое виртуальное устройство, фиксирующее токи и напряжения в точке, на самом деле не доступной нам для наблюдения.

То, что на вход АМО одновременно подаются и напряжения, и токи, может показаться ошибкой, ведь в действительности токи есть результат воздействия на объект источников ЭДС. Однако алгоритмическая модель является системой обработки информации, от которой

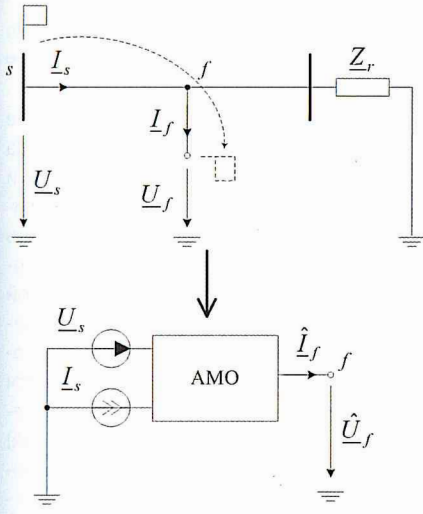


Рис. 2. Алгоритмическая модель линии электропередачи

требуется по фиксируемым в определённой точке схемы электрическим величинам определить скрытые от неё данные. Как видно из рис. 1 и 2, сведения, которыми располагают два типа моделей, различны.

Если параметры линии доступны и ИМО, и АМО, то информация об аварии и режиме работы систем от алгоритмической модели скрыта. Проблема отсутствия данных о режиме может быть решена привлечением векторов наблюдений с соответствующих концов линии, при этом речь уже будет идти об алгоритмах с многосторонним замером.

В зависимости от решаемой задачи, оценок электрических величин  $\hat{I}_f$  и  $\hat{U}_f$  в месте предполагаемого повреждения может быть достаточно. Если же це-

Табл. 1

Тип модели	Аналог	Доступные модели данные	Подаваемые на вход модели величины	Результат моделирования
Имитационная	Объект	1) Параметры линии электропередачи 2) Сведения о режиме (параметры систем) 3) Аварийные параметры	Вектор действующих в сети ЭДС $\underline{E}$	Вектор наблюдения $\underline{V}_s$
Алгоритмическая	Наблюдатель, виртуальное устройство	1) Параметры линии электропередачи 2) Параметры систем со сторон, для которых доступен вектор наблюдения	Вектор наблюдения $\underline{V}_s$	1) Оценки $\hat{I}_f$ и $\hat{U}_f$ 2) Оценки $\hat{x}_f$ и $\hat{R}_f$

лью является определение самих параметров аварии  $x_f$  и  $R_f$ , то от АМО требуется получение их оценок.

В табл. 1 приведён сравнительный анализ двух типов моделей.

#### Адекватность моделей

Когда мы говорим о моделях энергообъектов, обязательно встаёт вопрос об их адекватности, и он связан не только с проблемой ограниченности доступной для модели информации (как видим, АМО может лишь «догадываться» о реальном режиме работы сети), но и с выбором базиса моделирования. Последнее определяется необходимостью компромисса между требуемой точностью расчёта и сложностью реализации алгоритма. Что же касается недоступности для алгоритмической модели части данных, то эта проблема решается в каждой конкретной задаче по-своему.

Далее в статье, в качестве примера, речь пойдёт о применении алгоритмических моделей для решения конкретных задач РЗ: определения места повреждения (ОМП) и построения защиты дальнего резервирования (ЗДР).

#### Определение места повреждения

Определение места повреждения является задачей, от которой требуется нахождение неизвестных значений аварийных параметров. В данной статье мы не будем рассматривать топографические методы локации, а остановимся на дистанционном методе ОМП по параметрам аварийного режима, в котором алгоритмическая модель ЛЭП играет ключевую роль.

#### Описание алгоритма

В линейной электрической цепи любой конфигурации токи в ветвях и напряжения в узлах определяются схемой соединений элементов, значениями ЭДС и сопротивлениями ветвей. Повреждения приводят к изменению токов и напряжений во всей схеме, а это означает, что по результатам измерений токов и напряжений при возникновении короткого замыкания возможно вычислить значение сопротивления ветви, в которой произошло КЗ. Если этой ветвью является линия электрической сети, то вычисленное значение сопротивления однозначно связано с длиной участка линии от её начала до места аварии.

Рассмотрим простейшую однолинейную схему ЛЭП, изображённую на рис. 3. Относительно места аварии линия делится на два участка со следующими сопротивлениями:

$$\begin{aligned} Z_{n1} &= Z_n^0 x_f; \\ Z_{n2} &= Z_n^0 (L - x_f), \end{aligned}$$

где  $Z_n^0$  – комплексное удельное сопротивление ЛЭП, а  $L$  – длина линии. Для данной схемы можно составить следующие уравнения по закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} \underline{U}_s - Z_{n1} \underline{I}_s - \underline{U}_f = 0; \\ \underline{U}_r - Z_{n2} \underline{I}_r - \underline{U}_f = 0; \\ \underline{U}_s - \underline{U}_r - Z_{n1} \underline{I}_s + Z_{n2} \underline{I}_r = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Данные уравнения являются функциями одной переменной – координаты места повреждения  $x_f$ .

Общее решение задачи идентификации заключается в анализе изменения целевой функции, что позволяет исключить влияние многих случайных факторов. Общим критерием определения места КЗ служит условие достижения целевой функцией глобального минимума при множестве варьируемых параметров. Простейшей целевой функ-

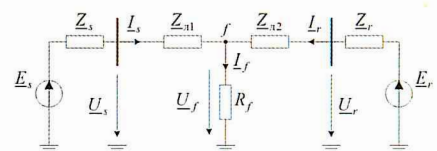


Рис. 3. Схема с двухсторонним питанием

цией может служить невязка уравнений (1), то есть отличие правой части уравнения от нуля. Для получения значений невязок следует изменять значение координаты  $x$  от нуля до  $L$  и, предполагая в данной точке продольную ветвь повреждения, строить зависимость модуля правой части  $y$  от расстояния  $-y(x)$ .

В принципе, функций невязки может быть множество. Однако самой универсальной является функция реактивной мощности  $Q_f$  в месте КЗ [2]. Она соответствует предпосылке, что все переходные сопротивления в месте короткого замыкания резистивны. Это выражается в следующем:

$$Q_f = \text{Im}(\underline{U}_f \hat{\underline{I}}_f) = 0.$$

Величины  $\underline{I}_f$  и  $\underline{U}_f$  нам не доступны – возможно лишь получение их оценок. Переход от величин напряжений и токов в месте установки устройства к вектору  $[\hat{\underline{U}}_f \hat{\underline{I}}_f]$  может определяться формулой (так называемые формульные или явные методы ОМП) либо моделью ЛЭП (модельные или неявные методы).

НПП «Бреслер» выпускает устройство «Бреслер-0107.090», предназначенное для определения места повреждения линий электропередачи напряжением 6-750 кВ с односторонним и двухсторонним питанием [3]. В нём реализован модельный метод дистанционного ОМП, что выгодно отличает его от существующих аналогов. Оценки  $\hat{\underline{U}}_f$  и  $\hat{\underline{I}}_f$  формирует алгоритмическая модель рассматриваемой системы (структурная схема алгоритма ОМП изображена на рис. 4).

На основании измеренных аналоговых сигналов  $[\underline{U}_v \ \underline{I}_v]$  ( $v$  – обозначение фаз А, В, С) фазовый селектор определяет вид повреждения, особую фазу и относительно неё рассчитывает симметричные составляющие  $[\underline{U}_s \ \underline{I}_s]$  напряжений и токов, где  $s$  – обозначение последовательностей 1, 2, 0.

Алгоритмическая модель линии электропередачи позволяет найти оценки  $[\hat{\underline{U}}_{s,f} \ \hat{\underline{I}}_{s,f}]$  симметричных составляющих напряжений  $\underline{U}_f$  и токов  $\underline{I}_f$  в ветви предполагаемого повреждения в произвольной точке  $x$  линии и построить целевую функцию вдоль всей ЛЭП. Каждому виду повреждения при этом соответствует своя целевая функция  $f(\hat{\underline{U}}_{s,f} \ \hat{\underline{I}}_{s,f})$ , фактически являющаяся функцией координаты  $x$ . Далее определяется сигнатура реактивной мощности и по смене её знака фиксируется координата аварии  $x_f$ .

#### Структура модели и её адекватность

Адекватность модели, используемой в описанном выше алгоритме, зависит от следующих факторов:

- 1) точности описания самой линии электропередачи;
- 2) отсутствия или наличия информации о режиме работы систем.

Описание ЛЭП включает в себя сведения о проводах, опорах, тросах, используемых на различных участках линии, сопротивлении земли, а также коридорах взаимного влияния ЛЭП. Это априорная информация, которая считается известной и фиксированной, и адекватность модели в данном случае

зависит от того, насколько подробно была описана рассматриваемая линия электропередачи.

Эквивалентное сопротивление системы с противоположного конца ЛЭП определяется режимом работы и потому является варьируемой величиной. Данная информация может быть получена только с привлечением вектора наблюдения  $\underline{V}_r$  с противоположной стороны. Таким образом, алгоритмическая модель, использующая односторонний замер, в общем случае является неадекватной, поскольку сопротивление противоположной (неизвестной) системы берётся исходя из заранее заданных режимов работы сети. Естественно, при многостороннем замере данная проблема полностью решается, чем и определяется значительно более высокая точность двух- и многостороннего ОМП.

#### Пример расчёта алгоритмической модели

Рассмотрим расчёт алгоритмической модели линии электропередачи длиной  $L$  на примере простейшей однолинейной схемы (рис. 3). Предполагаем повреждение в точке  $x$  и относительно неё разбиваем ЛЭП на две части с соответствующими сопротивлениями  $\underline{Z}_{n1} = \underline{Z}_n^0 x$  и  $\underline{Z}_{n2} = \underline{Z}_n^0 (L - x)$ . При этом

$$\underline{Z}_n = \underline{Z}_{n1} + \underline{Z}_{n2} = \underline{Z}_n^0 L.$$

При одностороннем замере в модель необходимо внести сопротивление противоположной системы  $\underline{Z}_r$ . В результате, получим схему, изображённую на рис. 5.

Расчёт АМО заключается в получении комплексных коэффициентов, связывающих электрические величины в месте предполагаемого повреждения с вектором наблюдения  $[\underline{U}_s \ \underline{I}_s]$ . Эту зависимость можно представить следующим образом:

$$\underline{U}_f = \underline{B}_{11} \underline{U}_s + \underline{B}_{12} \underline{I}_s;$$

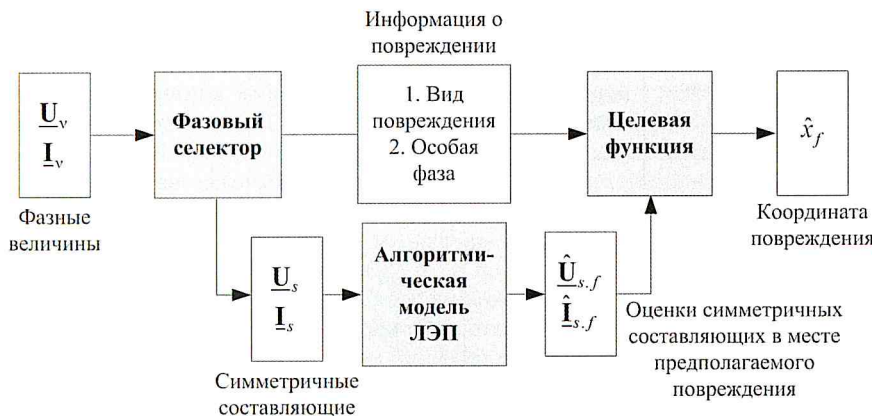


Рис. 4. Структурная схема алгоритма ОМП

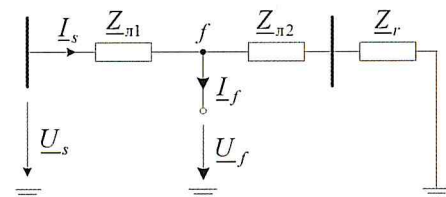


Рис. 5. Пример расчёта алгоритмической модели

$$I_f = B_{21} U_s + B_{22} I_s$$

Для схемы на рис. 5 запишем уравнения, составленные по законам Кирхгофа:

$$U_f = U_s - Z_{n1} I_s;$$

$$I_f = I_s - \frac{U_f}{Z_{n2} + Z_r} = I_s - \frac{U_s - Z_{n1} I_s}{Z_{n2} + Z_r} = -\frac{1}{Z_{n2} + Z_r} U_s + \frac{Z_{n1} + Z_r}{Z_{n2} + Z_r} I_s,$$

из которых легко получить выражения для коэффициентов  $B$ :

$$B_{11} = 1; \quad B_{12} = -Z_{n1};$$

$$B_{21} = -\frac{1}{Z_{n2} + Z_r}; \quad B_{22} = \frac{Z_{n1} + Z_r}{Z_{n2} + Z_r}.$$

Конечно же, в реальности рассматривается трёхфазная система, в результате чего описание алгоритмической модели получается гораздо сложнее. Однако принцип получения коэффициентов АМО остаётся таким же.

### Защита дальнего резервирования

Защита дальнего резервирования предназначена для селективного отключения линии электропередачи напряжением 35-220 кВ при замыканиях в силовых трансформаторах и на стороне низшего напряжения ответвительных подстанций. Осуществить защитами линий дальнее резервирование при замыкании в ответвительной подстанции непросто, поскольку нагрузка линий электропередачи в большинстве случаев значительно превышает номинальную мощность отпайки [4]. Привлечение алгоритмических моделей и расширение информационной базы, доступной АМО, позволяет решить данные проблемы и значительно увеличить чувствительность защиты.

### Описание алгоритма

Для того чтобы идентифицировать повреждение на низшей стороне и, тем более, определить конкретную ответвительную подстанцию, на которой произошло замыкание, необходимо отслеживать токи и напряжения в ответвительных подстанциях. Устройство, устанавливаемое на головном конце линии, этой информацией не обладает.

Проблема выявления повреждения отпайного трансформатора решена путем расшире-

ния информационной базы защиты. С помощью нового метода, названного информационным анализом [4, 5], разработана защита дальнего резервирования «Бреслер-0107.030», оперирующая всей доступной информацией при наблюдении за линией электропередачи с одного конца. В её основу положен адаптивный дистанционный принцип [6], оперирующий алгоритмической моделью объекта, что равноценно установке на низшей стороне трансформатора виртуального реле сопротивления (ВРС), оценивающего ток  $I_f$  и напряжение  $U_f$  в ветви предполагаемого повреждения  $f$  и определяющего факт замыкания (рис. 6). С помощью алгоритмических моделей удаётся настроить виртуальные реле на каждую защищаемую ответвительную подстанцию, если их несколько. На рис. 7 представлена структурная схема алгоритма защиты дальнего резервирования.

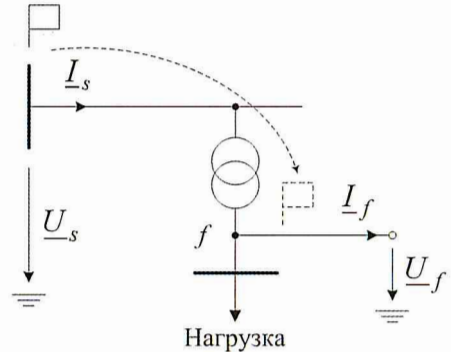


Рис. 6. Отслеживание величин в ветви предполагаемого повреждения

Чтобы отстроиться от нагрузочного режима, в алгоритме ЗДР используются чисто аварийные составляющие, под которыми понимаются разности векторов тока или напряжения в текущем и предаварийном режиме

$$U^{ab} = U^{TK} - U^{нд};$$

$$I^{ab} = I^{TK} - I^{нд}.$$

Рассмотрим принцип построения АМО, используемой в защите дальнего резервирования, на примере рис. 8, на котором изображена линия с ответвительной подстанцией и её схема замещения.

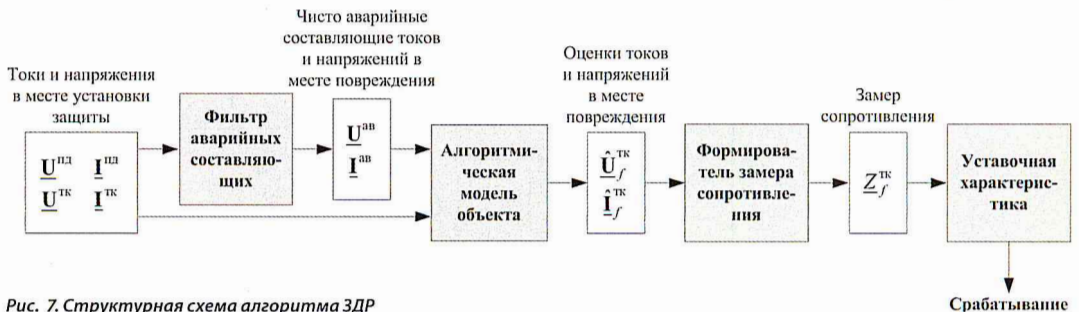


Рис. 7. Структурная схема алгоритма ЗДР



**Бычков Юрий Владимирович**

Дата рождения:

28.12.1983 г.

Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 2007 г., кафедра «ТОЭ и РЗА».

Заведующий сектором

ОМП ООО НПП

«Бреслер».



**Васильев Дмитрий Сергеевич**

Дата рождения:

08.06.1984 г.

Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 2007 г., кафедра «ТОЭ и РЗА».

Заведующий сектором

ЗДР ООО НПП

«Бреслер».

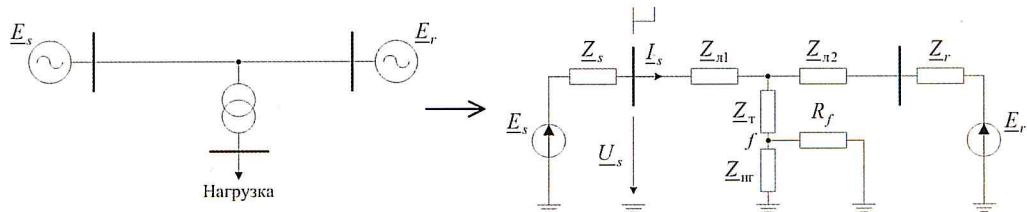


Рис. 8. Линия с ответвительной подстанцией и схема её замещения

Здесь приняты следующие обозначения:  $Z_{л1}$  и  $Z_{л2}$  – сопротивления участков линии до и после отпайки соответственно,  $Z_T$  – сопротивление трансформатора,  $Z_{нГ}$  – сопротивление нагрузки.

В ЗДР алгоритмическая модель объекта разделяется на модель предшествующего и чисто аварийного режимов. Модель предрежима формирует замер напряжений  $\underline{U}_f^{пд}$  в ветви предполагаемого повреждения по вектору наблюдения  $\underline{V}_s^{пд}$  и не зависит от параметров части схемы после рассматриваемой отпайки. АМО в предшествующем режиме представлена следующей формулой

$$\underline{U}_f^{пд} = K_1^{пд} \underline{U}_s^{пд} + K_2^{пд} \underline{I}_s^{пд} \quad (2)$$

и изображена на рис. 9а.

Модель чисто аварийного режима (рис. 9б) формирует замер напряжений  $\underline{U}_f^{аб}$  и токов  $\underline{I}_f^{аб}$  в ветви предполагаемого повреждения по чисто аварийным составляющим напряжения  $\underline{U}_s^{аб}$  и тока  $\underline{I}_s^{аб}$  в месте установки защиты. Соответствующие выражения представлены ниже.

$$\begin{cases} \underline{U}_f^{аб} = K_1^{аб} \underline{U}_s^{аб} + K_2^{аб} \underline{I}_s^{аб}; \\ \underline{I}_f^{аб} = K_3^{аб} \underline{U}_s^{аб} + K_4^{аб} \underline{I}_s^{аб}. \end{cases} \quad (3)$$

Кроме алгоритмической модели объекта в алгоритм ЗДР входит формирователь замера сопротивления, который объединяет информацию о токах и напряжениях различных режимов (предшествующего и чисто аварийного) в единый алгоритмический параметр – замер текущего сопро-

тивления в месте предполагаемого повреждения. Специфика отпаечного трансформатора такова, что возможны только два вида повреждения на низшей стороне трансформатора: междуфазные и трёхфазные замыкания. В защите реализовано четыре формирователя замера текущего сопротивления: три для междуфазных

$$\underline{Z}_{f,AB}^{тк} = \frac{U_{f,A}^{тк} - U_{f,B}^{тк}}{I_{f,A}^{тк} - I_{f,B}^{тк}}; \underline{Z}_{f,BC}^{тк} = \frac{U_{f,B}^{тк} - U_{f,C}^{тк}}{I_{f,B}^{тк} - I_{f,C}^{тк}}; \underline{Z}_{f,CA}^{тк} = \frac{U_{f,C}^{тк} - U_{f,A}^{тк}}{I_{f,C}^{тк} - I_{f,A}^{тк}}$$

и один для трёхфазного замыканий

$$\underline{Z}_f^{тк} = \frac{U_f^{тк}}{I_f^{тк}}$$

#### Структура модели и её адекватность

Как видно из рис. 9, АМО, используемая в защите дальнего резервирования, включает в себя параметры линии, трансформатора, нагрузки и смежной с отпайкой части системы. О зависимости точности модели от априорной информации речь шла в части статьи, посвящённой ОМП. Здесь же добавим, что нагрузка трансформатора, как и его параметры (в зависимости от положения РПН) не являются постоянными, а на смежных объектах могут происходить различные переключения. АМО об этом ничего не знает, а это означает, что на практике модель не адекватна объекту, и, в результате, происходит смещение замера ВРС.

В рассматриваемом алгоритме в целях упрощения операции определения попадания замера в уставочную область используется ли-

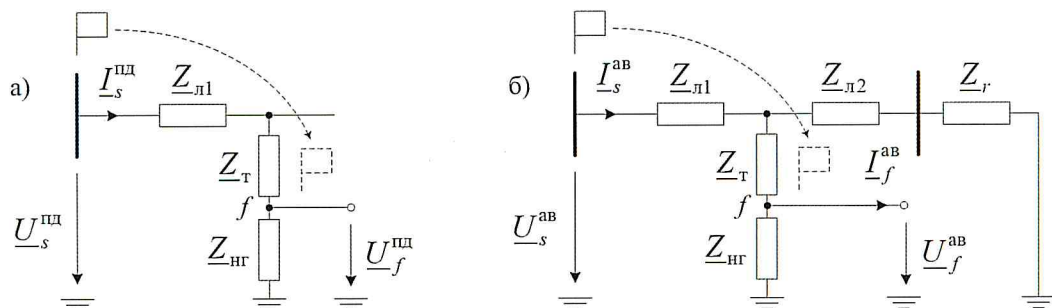


Рис. 9. Алгоритмическая модель предшествующего (а) и чисто аварийного (б) режимов



**Павлов Александр**

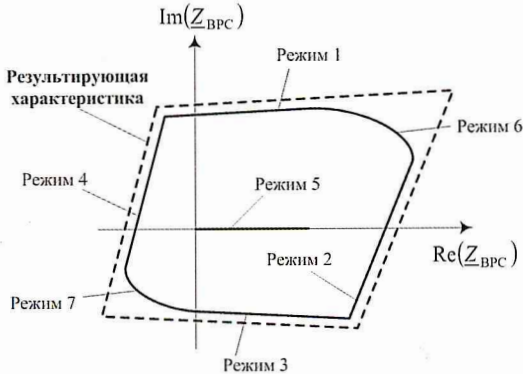
**Олегович**

Дата рождения:

14.11.1975 г.

Окончил Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова в 1998 г., кафедра «ТОЭ и РЗА». В 2002 г. в Чувашском госуниверситете защитил кандидатскую диссертацию «Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования». Начальник отдела РЗА ООО НПП «Бреслер».

нейная аппроксимация сложной области наблюдаемых режимов четырёхугольником. Для каждого из состояний защищаемого объекта по опытам коротких замыканий строится уставочная характеристика, а результирующая – отстраивается от альтернативных режимов и охватывает все промежуточные додографы, как показано на рис. 10.



**Рис. 10.** Построение результирующей уставочной области

**Пример расчёта алгоритмической модели**

Как и для ОМП, приведём пример расчёта алгоритмической модели ЗДР. За основу возьмём рис. 9. Расчёт АМО означает получение вырежений для комплексных коэффициентов, входящих в уравнения (2) и (3).

Для алгоритмической модели предшествующего режима можем записать:

$$U_f^{на} = \frac{U_s^{на} - Z_{n1} I_s^{на}}{Z_T + Z_{nr}} Z_{nr}$$

откуда вытекают равенства:

$$K_1^{на} = \frac{Z_{nr}}{Z_T + Z_{nr}}; \quad K_2^{на} = -\frac{Z_{n1} Z_{nr}}{Z_T + Z_{nr}}$$

Анализ АМО чисто аварийного режима даст следующие уравнения:

$$U_f^{ав} = U_s^{ав} - Z_{n1} I_s^{ав} - Z_T I_T^{ав}; \quad I_f^{ав} = I_T^{ав} - \frac{U_f^{ав}}{Z_{nr}};$$

$$I_T^{ав} = I_s^{ав} - \frac{U_s^{ав} - Z_{n1} I_s^{ав}}{Z_{n2} + Z_r},$$

решив которые получим значения искомым коэффициентов:

$$K_1^{ав} = \frac{Z_{n2} + Z_r + Z_T}{Z_{n2} + Z_r};$$

$$K_2^{ав} = -\frac{Z_{n1} (Z_{n2} + Z_r) + Z_T (Z_{n1} + Z_{n2} + Z_r)}{Z_{n2} + Z_r};$$

$$K_3^{ав} = -\frac{Z_{n2} + Z_r + Z_T + Z_{nr}}{Z_{nr} (Z_{n2} + Z_r)};$$

$$K_4^{ав} = -\frac{Z_{n1} (Z_{n2} + Z_r) + (Z_T + Z_{nr})(Z_{n1} + Z_{n2} + Z_r)}{Z_{nr} (Z_{n2} + Z_r)}.$$

**Заключение**

1. В результате сравнительного анализа установлено, что в ряде задач РЗА, таких как защита дальнего резервирования, определение места повреждения, целесообразно использовать алгоритмическое моделирование.
2. Благодаря АМО современная релейная защита способна: оценивать – распознавать режимы; в случае необходимости привлекать дополнительную информацию; корректировать свои алгоритмы и тем самым адаптироваться к каждому конкретному случаю.
3. С использованием результатов алгоритмического моделирования и алгоритмических моделей в НПП «Бреслер» реализованы защиты дальнего резервирования, терминалы и программные комплексы определения места повреждения.

**Литература:**

1. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Алгоритмические модели электрических систем // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 1999. – № 1 2. – С. 10-21.
2. Лямец Ю.Я., Ильин В.А. Патент на изобретение № 2107304 Российской Федерации. Способ определения места повреждения ЛЭП с двухсторонним питанием. – Опубликовано 20.03.1998.
3. Бычков Ю.В., Павлов А.О. Реализация алгоритма определения места повреждения в микропроцессорном терминале «Бреслер 0107.5X» // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. / Изд-во Чуваш. ун-та. – Чебоксары, 2007. – № 2. – С. 78-81.
4. А.О. Павлов, Д.С. Васильев. Высокочувствительная защита дальнего резервирования линий электропередачи // Энергетик. – 2008. – № 12. – С. 5-7.
5. Д.С. Васильев, В.Н. Козлов, А.О. Павлов. Развитие высокочувствительной защиты дальнего резервирования // Релейная защита и автоматизация. – 2011. – № 2. – С. 24-28.
6. Павлов А.О. Информационные аспекты распознавания коротких замыканий в линиях электропередачи в приложении к защите дальнего резервирования: канд. диссертация. – Чебоксары, Чуваш. ун-т, 2002.
7. Шнейерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат. – 2007.
8. Y. Liameis, S. Ivanov, A. Podchivaline, G. Nudelman, J. Zakonjsek Informational analysis – new relay protection tool // Proc. 13th Int. Conf. Power System Protection. – Bled, 2002. – P. 197 210.