

Автор:
к.т.н. Ефремов В.А.
ООО ИЦ «Бреслер»,
г. Чебоксары, Россия

Efremov V.A. LLC
«Research Center
«Bresler»,
Cheboksary, Russia.

Ключевые слова: определение места повреждения, алгоритмы ОМП, погрешности ОМП, эквивалентирование для целей ОМП

Annotation: in this article the reasons of errors in calculation of line fault location and also the ways of error reduction are shown.

Keywords: line fault location, algorithms of line fault location, errors of line fault location, scheme equivalent for line fault location purposes.

ВИДЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОМП И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ ЗАМЕРА

УДК 621.315.1

KINDS OF ERRORS IN LINE FAULT LOCATION AND THEIR INFLUENCE TO MEASUREMENT ACCURACY

Аннотация: рассмотрены причины погрешностей в расчете ОМП и пути их уменьшения в конечном результате

В настоящее время известны различные способы и алгоритмы определения места повреждения (ОМП) для воздушных линий электропередачи. Наиболее эффективными из них являются методы, основанные на параметрах аварийного режима, т.е. используют ту же информационную базу, что и микропроцессорные (МП) защиты и регистраторы аварийных событий (РАС). Для решения проблемы ОМП могут быть использованы и другие способы, среди которых наиболее привлекательны волновые методы, однако они требуют специальной аппаратуры, применение которой в микропроцессорных защитах и РАС может быть затруднительно, и сегодня таких реализаций на рынке не наблюдается.

Для минимизации погрешности ОМП необходим комплексный подход. Все многообразие факторов, влияющих на погрешность оценки расстояния до места повреждения на основе параметров аварийного режима, можно подразделить на следующие:

- **погрешности измерительных цепей** (измерительных трансформаторов, промежуточных преобразователей и т.п.);
- **методическая погрешность** самого алгоритма ОМП;
- **погрешности моделирования**, обусловленные:
 - неточным заданием априорной информации о структуре и параметрах контролируемых линий и систем;
 - режимами работы;
 - различием удельной проводимости земли вдоль трассы ЛЭП;
 - погрешностями от несимметричного расположения проводов на опорах;
 - неточным моделированием параметров нулевой последовательности линий и т.п. [1].

Проанализируем различные факторы, влияющие на погрешность расчета.

Измерительные погрешности обусловлены погрешностями измерительных трансформаторов и входных цепей защит и РАС и проявляются в искажении измеряемого сигнала по амплитуде и фазе. Амплитудные погрешности измеряются и учитываются в расчетах достаточно просто. Фазовые же искажения оказывают более значительное влияние на точность расчетов и менее доступны для измерения и компенсации вследствие нелинейности фазовой характеристики используемых трансформаторов. В табл.1¹ приведена относительная приведенная погрешность ОМП при наличии фазовых искажений (в эл. град.) в канале тока при прямой передаче мощности для транзитной ЛЭП-110 длиной 100 км. Исследования производились при повреждениях в начале, середине и конце линии, соответственно в 5%, 50% и 95% от длины линии с переходным сопротивлением $R_f = 10$ Ом. При равных условиях, но обратной передаче мощности погрешности, указанные в табл. 1, возрастают более чем в два раза.

Для устранения погрешностей входных цепей устройства ОМП проводится измерение реакции на тестовые эталонные сигналы и вводится необходимая коррекция комплексного коэффициента, обычно по току $I_{ax} = k \cdot I_{ax} = k \cdot e^{j\alpha} \cdot I_{ax}$, где I_{ax} – информационный ток алгоритма ОМП; I_{ax} – входной ток устройства; k и α соответственно модуль и аргумент коррекционного коэффициента; рекомендуется к изменению в пределах $k=0.98 \div 1.02$, а $\alpha = \pm(2 \div 5)^\circ$. Применение большего диапазона не может быть рекомендовано из-за возникающих дополнительных погрешностей вследствие изменения переходного сопротивления в месте поврежде-

¹ Расчеты проведены на программном комплексе ОМП DISAN\LOCATOR

Табл. 1

$\Delta\varphi$	-10°	-5°	-1°	0°	1°	5°	10°
$X_f = 5\%$	2.47	1.24	0.25	0.0	-0.25	-1.26	-2.53
$X_f = 50\%$	3.5	1.9	0.40	0.03	-1.4	-2.1	-4.4
$X_f = 95\%$	9.0	4.9	0.90	0.27	-1.0	-5.3	-11.1

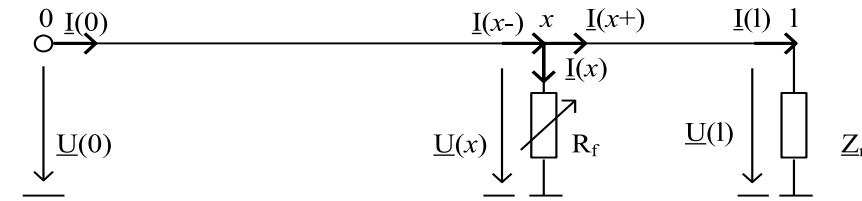


Рис. 1. Токи и напряжения линии для ОМП

ния. Сам по себе способ коррекции коэффициента передачи k универсален и может быть использован для устранения других погрешностей, в т.ч. и погрешностей моделирования.

После устранения погрешностей во входных цепях устройства необходимо выполнить компенсацию погрешностей в измерительных трансформаторах тока и напряжения подстанции. Для этих целей обычно используют результаты расчета ОМП с известными местами междуфазного повреждения на линии, например, путем минимизации рассмотренной погрешности на основе проведения ряда опытных КЗ. Выбранный вид междуфазного повреждения в качестве информационного параметра позволяет применить величины обратной последовательности, для которых, в отличие от величин нулевой последовательности, стабильны параметры модели линии (схемы замещения) и исключена нагрузочная составляющая тока прямой последовательности. В процессе эксплуатации по мере накопления информационной базы о контролируемой линии, корректирующие коэффициенты уточняются для повышения точностных характеристик измерительных каналов устройства ОМП при повреждениях вдоль всей линии электропередачи. Появля-

ющаяся дополнительная погрешность измерительных цепей в случаях нелинейного или нестабильного переходного сопротивления, наличия апериодической составляющей, при быстрых (45 мс и менее) отключениях повреждения элегазовыми выключателями и т.п. в известных программных продуктах для ОМП устраняется применением специального инструмента по поиску наиболее стабильного участка на аварийной записи режима КЗ.

Методическая погрешность алгоритма ОМП. Рассмотрим алгоритмы на основе параметров аварийного режима. Известно, что повреждение на линии носит резистивный характер. На основе данного утверждения возможно построение различных способов ОМП [2]. Поиск места повреждения производится по целевой функции в виде реактивной мощности повреждения, в общем случае

$$\sigma(x) = Q_{f\Sigma}(x) = \sum_{v=A,B,C} \text{Im}[U_v(x) I_v^*(x)].$$

Основным критерием качества алгоритмов ОМП является точность расчета расстояния до места короткого замыкания на линии электропередачи. С этой точки зрения все известные на сегодня алгоритмы и реализованные на их основе программы ОМП класси-

фицируются в две группы [3]:

- алгоритмы и программы, работающие без методической погрешности;
- алгоритмы и программы, изначально содержащие в себе методическую погрешность.

В общем случае различия в алгоритмах можно проиллюстрировать на рис. 1, где показаны токи и напряжения на линии. Алгоритмы, работающие без методической погрешности, предполагают расчет тока $I(x)$ в поперечной ветви повреждения, где x – текущая координата на линии $0 \leq x \leq l$. Расчет такого тока $I(x)$ возможен при учете величин предаварийного режима. В отсутствие информации о предаварийном режиме приходится использовать алгоритмы, в которых место замыкания оценивается с некоторой погрешностью. Методическая погрешность алгоритма тем меньше, чем меньше разность фазных токов $I(0)$ и $I(x_f)$, где x_f – место повреждения. Более высокую точность определения места замыкания имеют программы, производящие пересчет измеренного тока $I(0)$ в точку предполагаемого повреждения $I(x-)$, что теоретически можно объяснить тем, что $\{\arg[I(x)] - \arg[I(0)]\} > \{\arg[I(x)] - \arg[I(x-)]\}$. Чем больше угол линии $\varphi_n = \arctg(X^o/R^o)$ отличается от 90° (линии без потерь), тем большей будет методическая погрешность алгоритма ОМП, что подтверждается и практикой: ОМП на ЛЭП-500 дает меньшую относительную погрешность, чем на линиях 110 кВ.

Расчет тока $I(x) = I(x-) - I(x+)$ в поперечной ветви повреждения в алгоритмах без методической погрешности предполагает расчет схемы в части ненаблюдаемого конца линии. Ток ненаблюдаемого конца определяется как $I(x+) = U(x) / [Z_{\Sigma \text{ линии}}(x+) + Z_r]$, где суммарное сопротивление на участках линии от x до l ; Z_r – эквивалентное сопротивление ненаблюдаемого конца линии. Учет в алгоритмах ОМП предшествующего режима позволяет определять эквивалентные сопротивления прямой (обратной), нулевой



последовательности и эквивалентное E_3 ЭДС «за спиной» устройства (рис.2). Установка устройств ОМП по концам линии позволяет определять параметры ненаблюдаемого конца линии, тем самым выполнить двустороннее ОМП без методической погрешности. Эффективность одновременной обработки осциллограмм с двух сторон особенно проявляется в параметрах прямой последовательности, наиболее зависимых от текущего режима.

Программный комплекс ОМП должен включать в себя множество алгоритмов, работающих либо только с текущей информацией, либо использующих еще и токи и напряжения предшествующего режима. Критерием выбора нужного алгоритма является наличие информации о предшествующем режиме и выявленный вид повреждения [3]. В нагрузочном режиме должны функционировать алгоритмы без методической погрешности, и результат ОМП будет тем точнее, чем больше имеется априорной информации об объекте и результатов его моделирования. Отсутствие информации о предаварийном режиме, например, при опробовании линии напряжением или ТАПВ, всегда приводит к выбору алгоритмов, имеющих методическую погрешность

Погрешности моделирования определяются неадекватностью математической модели реальному объекту, заключающейся в нарушении структуры и неточном задании системных параметров. Структурные ошибки проявляются в неправильном учете заземлений трансформаторов ответственных подстанций и являются следствием недостатка информации об объекте. Некорректности в параметрах модели обусловлены неточностями в удельных параметрах (табл.3). При трехкратном изменении сопротивлений эквивалентных систем одновременно по прямой и нулевой последовательности при $R_f = 30$ Ом погрешность не превысила $\pm 3\%$.

Из всего многообразия решаемых задач моделирования для алгоритмов без методической погрешности рассмотрим две наиболее актуальные задачи, влияние которых на точности замера оказывается наиболее значимыми: расчет параме-

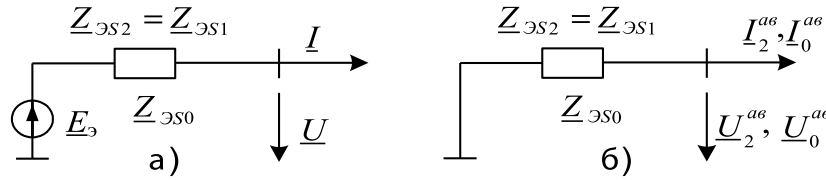


Рис. 2. Модели для определения эквивалентных сопротивлений и ЭДС
а) исходная; б) для аварийных величин

Табл. 2

$(Z - Z_{ст}) / Z_{ст} * 100\%$	-200%	-100%	0%	100%	200%
$X_f = 5\%$	-0.5	-0.35	0.02	0.51	0.71
$X_f = 50\%$	-2.65	-1.81	0.03	1.91	2.75
$X_f = 95\%$	2.41	1.54	0.14	0.59	0.85

Табл. 3

$X_f, \%$	2	5	25	50	75	90	95
$Z_0^0, \text{Ом/км}$	0.439+ +j1.316	0.440+ +j1.315	0.445+ +j1.298	0.450+ +j1.263	0.470+ +j1.171	0.475+ +j1.0286	0.463+ +j0.922

тров эквивалентных систем и погонных параметров нулевой последовательности самой линии. Следует заметить, что погрешности, вызванные неверным учетом параметров эквивалентных систем и погонных параметров самой линии, принципиально отличаются друг от друга и не могут быть скомпенсированы общим параметром. Зависимость погрешности ОМП от неточности задания сопротивлений эквивалентных систем (табл.2) оказалась не столь значительной, как от фазовых искажений (табл.1) или от погрешностей в удельных параметрах (табл.3). При трехкратном изменении сопротивлений эквивалентных систем одновременно по прямой и нулевой последовательности при $R_f = 30$ Ом погрешность не превысила $\pm 3\%$.

Информации аварийного процесса достаточно для определения сопротивления прямой и обратной последовательностей, а также эквивалентной ЭДС «за спиной» (см. рис.2). При наличии двухстороннего осциллографирования эти дан-

ные могут быть использованы для расчетов с противоположного конца линии, тем самым понижается степень неопределенности знаний о текущем режиме и повышается точность моделирования.

Одной из самых сложных задач моделирования для целей ОМП является корректное определение удельных параметров нулевой последовательности линии. Влияние места КЗ на величины нулевой последовательности при наличии параллельных связей не позволяет получить однозначного решения задачи. В табл.3 приведены результаты расчета удельных сопротивлений нулевой последовательности в зависимости от точки повреждения при металлическом КЗ для двухцепной межсистемной ЛЭП длиной 100 км. Сопротивления эквивалентных систем приняты равными $Z_s = 2.0 + j15.0$, $Z_r = 1.0 + j10.0$.

Собственное сопротивление нулевой последовательности одной цепи линии составляет $Z_0^0 = 0.379 + j1.308$.

Изменения сопротивления нуле-



вой последовательности вдоль линии составляют 34%. Если выбрать удельные параметры по среднему значению $Z_{0\text{ср}}^0 = [Z_0^0(5\%) + Z_0^0(95\%)]/2 = 0.451 + j1.119$, то приведенная погрешность ОМП при неадекватности только по реактивной составляющей X_0^0 при металлическом КЗ достигает 10% и более от длины линии (табл. 4).

Из-за влияния места КЗ на величины нулевой последовательности модель приобретает неоднородность.

Построение имитационных моделей нулевой последовательности с учетом параллельных линий и/или проводящих сталеалюминевых тросов или их эквивалентирование для целей ОМП предполагают измерение или расчет тока нулевой последовательности параллельной линии (троса). В общем случае этот ток состоит из двух составляющих: наведенного тока от основной линии и тока, обусловленного наличием гальванической связи между двумя линиями. Причем эти составляющие могут быть синфазными, что усиливает влияние параллельной линии на основную ЛЭП, или находиться в противофазе, ослабляя это влияние. Однако применение второй гальванической составляющей тока в алгоритмах имитационных моделей ОМП учитывается редко.

Рассмотрим влияние магнитной и гальванической (электрической) связей на расчет погонных параметров нулевой последовательности на примере двухцепной линии Чувашэнерго «Катраси – ТЭЦ-2», «Катраси – ТЭЦ-3» (рис.3).

Известны подходы [5] к построению моделей, учитывающих влияние магнитной связи на величины сопротивлений нулевой последовательности (рис.4). Их достоинством является возможность учета всех параллельных линий, идущих в одном коридоре без замера токов в этих линиях. В этом случае расчет удельных сопротивлений для k -го участка в предположении повреждения в точке осуществляется итерационным методом по формуле:

$$Z_{-m}^0(k) = Z_0^0 - \frac{Z_{-s\Sigma}^M - k_m \cdot Z_{r\Sigma}^M}{Z_2} \cdot Z_0^M, \quad \text{где}$$

Табл. 4

$\Delta X_0^0 / X_{0\text{эм}}^0 * 100\%$	-20%	-10%	0%	10%	20%
$X_f = 5\%$	0.8	0.4	0.0	-0.3	-0.6
$X_f = 50\%$	8.1	3.8	0.01	-3.3	-6.1
$X_f = 95\%$	12.2	5.1	0.03	-5.8	-11.4

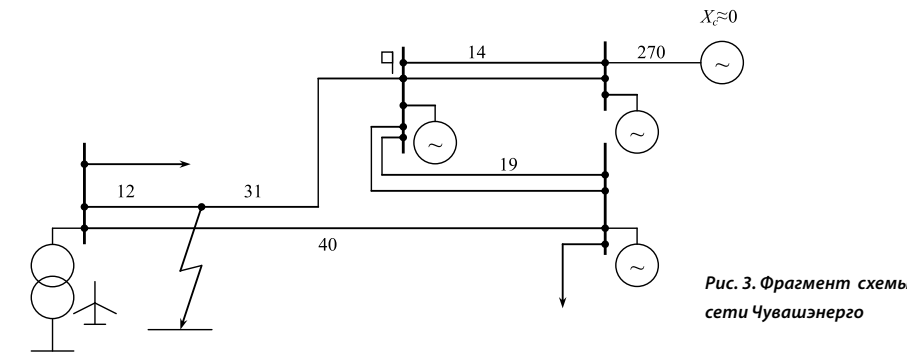


Рис. 3. Фрагмент схемы сети Чувашэнерго

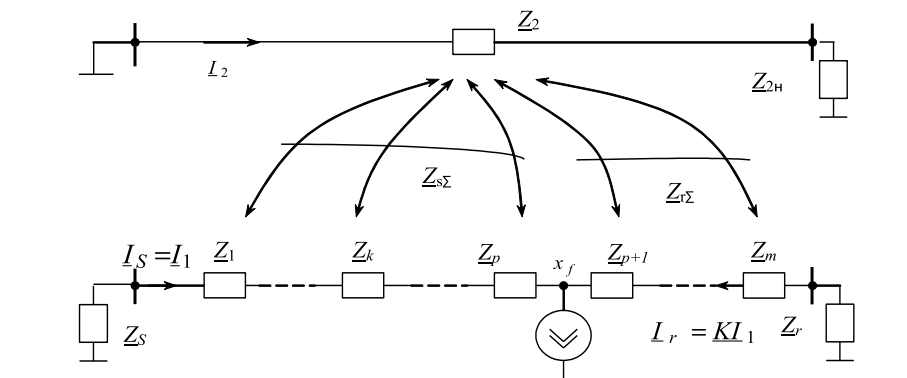


Рис. 4. Модель сети с учетом магнитной связи

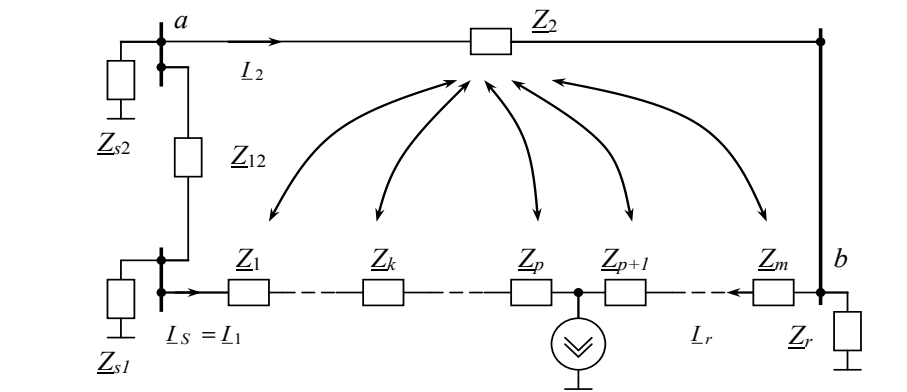


Рис. 5. Модель сети с учетом магнитной и электрической связей



Ефремов Валерий Александрович
Кандидат технических наук
Директор Центра применения продукции ООО «ИЦ «Бреслер»
Доцент кафедры ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета
Защитил в 1993 г. кандидатскую диссертацию на тему «Адаптивный дистанционный принцип и средства его реализации» в Санкт-Петербургском техническом университете

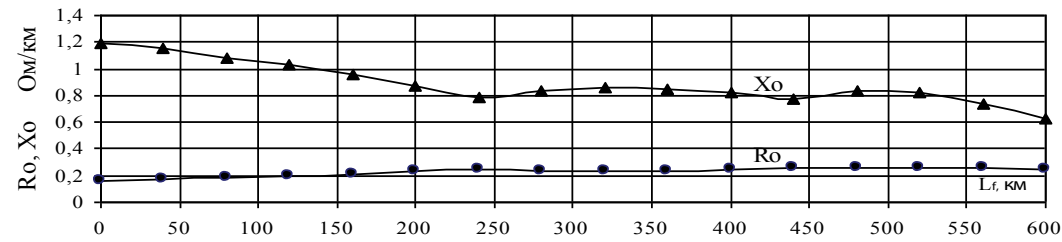


Рис. 5. Модель сети с учетом магнитной и электрической связей

$$\underline{k}_m = \frac{\underline{Z}_s + \sum_{i=1}^p \underline{Z}_i^0 \cdot l_i}{\underline{Z}_r + \sum_{i=p+1}^m \underline{Z}_i^0 \cdot l_i}$$

Более точная модель требует учета и электрической связи (рис.5). В этой схеме ненаблюдаемый ток равен $I_2 = I_{2s} + I_{2m}$, где I_{2s} – составляющая от магнитной связи; I_{2m} – составляющая от электрической связи. Путем очевидных преобразований и схемы на рис.4 можно получить:

$$I_{2s} = I_s \frac{k_m \cdot \underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_\beta}{\underline{Z}_2} = k_s I_s, \text{ где } \underline{Z}_\alpha, \underline{Z}_\beta - \text{эквивалентные сопротивления, тогда расчетные выражения для удельных сопротивлений нулевой последовательности для таких схем примут вид:}$$

$$\underline{Z}_{m,0}^0(k) = \underline{Z}_0^0 - \frac{\underline{Z}_s^m - k_m \cdot \underline{Z}_r^m + k_s \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_2} \cdot \underline{Z}_0^m = \underline{Z}_0^0 - k_s \cdot \underline{Z}_0^m$$

Для рассматриваемой ЛЭП усредненные расчетные величины нулевой последовательности будут равны: $\underline{Z}_0^0 = 0.35 + j1.35$; \underline{Z}_m^0 принимает значения от \underline{Z}_0^0 до $\underline{Z}_0^0/2$ в зависимости от места повреждения; $\underline{Z}_0^m = 0.15 + j1.0$; $k_m \approx 0.9$; $k_s \approx 0.2$.

Рассмотренные методы снижения погрешностей ОМП позволяют для линий 110-220кВ свести эти величины до значений 0.2÷1.0% от длины ЛЭП. Иная ситуация в длинными линиями межсистемных электрических сетей класса 500-750кВ, оборудованными проводящими тросами, которые создают сильную зависимость эквивалентных первичных сопротивлений от места предполагаемого повреждения \hat{x}_f . Функции $X_0^0(\hat{x}_f)$, $R_0^0(\hat{x}_f)$ носят сложный характер по причине заземления проводящих тросов в определенных точках трассы линии. Характерным примером описанных ЛЭП является воздушная линия 500кВ МЭС Востока «Амурская-Хабаровская» длиной 589,4 км с двумя проводящими тросами, заземленными в 6 местах, которая в настоящее время разрезана подстанцией Бурейской ГЭС.

Удельная проводимость земли вдоль трассы этой ЛЭП изменяется примерно в два раза. На

рис. 6 приведены зависимости удельных параметров нулевой последовательности $X_0^0(x)$, $R_0^0(x)$ от длины линии с учетом наличия проводящих тросов на ней и проводимости земли.

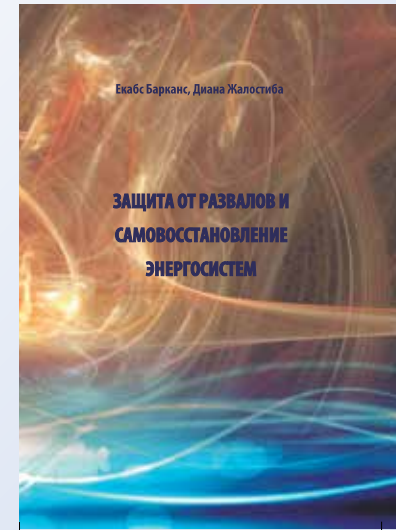
Выводы

1. Точность расчета места повреждения зависит от ряда факторов, которые должны быть учтены в программных комплексах ОМП.
2. Погрешности измерительных цепей подстанции и каналов устройства ОМП должны быть минимизированы корректирующими передаточными коэффициентами.
3. В программных комплексах ОМП предпочтение должно быть отдано алгоритмам без методической погрешности.
4. Сложные зависимости погонных параметров нулевой последовательности линии электропередачи наиболее эффективно могут быть учтены в итерационных алгоритмах ОМП.

Литература

1. Ефремов В.А., Лямец Ю.Я., Подшивалин Н.В. Анализ погрешностей алгоритмов определения места повреждения по одно- и двухстороннему наблюдению линий электропередачи в программном комплексе DISAN/LOCATOR// Электротехника и энергетика Поволжья на рубеже тысячелетий/ Сб. тезисов НПК. Чебоксары: Изд-во чуваш. ун-та, 2001. С.21-24.
2. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. Диагностика линии электропередачи. В кн. Электротехнические микропроцессорные устройства и системы. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992. С.9-33.
3. Ефремов В.А. Адаптивный дистанционный принцип и средства его реализации. Автореферат диссертации. Чебоксары 1993г. 24с.
4. Ефремов В.А., Лямец Ю.Я., Подшивалин Н.В. Модели линий электропередачи и точность определения места повреждения. В кн. Актуальные проблемы релейной защиты, противоаварийной автоматики, устойчивости и моделирования энергосистем. М.: Издательство НЦ «ЭНАС», 2001. С.224-225.
5. Ефремов В.А., Подшивалин Н.В. Цифровая модель линий электропередачи по нулевой последовательности. В кн.: Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике. Чебоксары. 1996. С. 85-86.

ГОТОВИТСЯ К ИЗДАНИЮ РУССКОЯЗЫЧНЫЙ ВАРИАНТ КНИГИ



Рекламно-издательским центром «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управления в электроэнергетике» (РИЦ «СРЗАУ») готовится к изданию на русском языке уникальная книга известного ученого и практика в области противоаварийного управления в энергосистемах Екабса Барканса и молодого ученого из Рижского Технического университета Дианы Жалостибы «**Защита от развалов и восстановление энергосистем**».

Англоязычный вариант этой книги был издан в Риге в рамках «Мирового энергетического совета» – Barkans J., Zelastiba D. Protection against blackouts and self-restoration of power systems // RTU Publishing House, Riga, 2009, 141 pp.

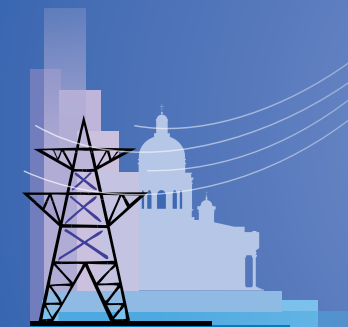
Это одна из редких книг, посвященных теме обеспечения надежности и живучести энергосистем и энергетических объединений. Одной из основных составляющих системы обеспечения надежности является тщательный анализ причин возникновения и развития аварий, имевших место в энергосистемах.

Авторы, проанализировав развалы энергосистем в различных странах мира, пришли к выводу, что, несмотря на огромное разнообразие первоначальных причин развалов, их развитие сводится всего лишь к нескольким процессам, которые могут быть поставлены под контроль средствами автоматики и предотвращены доступными средствами системами защиты.

Книга состоит из 9 глав и приложений. Особую ценность этой книге придает Приложение с описаниями развалов энергосистем (системных аварий), случившихся в Северной и Южной Америке, Канаде и Европе начиная с середины XX века. Книга отличается обширной библиографией и, несомненно, будет интересна широкому кругу специалистов в энергосистемах, преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений, слушателям курсов повышения квалификации и дополнительного образования в области электроэнергетики.

За дополнительной информацией обращайтесь по телефонам: (8352) 226-394, 226-395.

Предварительные заявки (в свободной форме с указанием количества экземпляров и контактными данными) на приобретение книги направляйте в РИЦ «СРЗАУ» на e-mail: ina@srzau-ric.ru.



Научно-практическая конференция

«РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ»

Проводится в рамках Российского Международного Энергетического Форума на XXI выставке «Энергетика и Электротехника» (17-20 июня 2014 г.)

18 июня 2014 года, г. Санкт Петербург,
Большой проспект, 103, ВК «Ленэкспо», павильон 7, зал 7-3.

Цель Конференции:

Обмен мнениями по формированию основных направлений дальнейшего развития систем РЗА, ПА и автоматизации электрических сетей на основе опыта внедрения микропроцессорных устройств РЗА и систем управления в электрических сетях.

Основная тематика Конференции:

Основные результаты внедрения микропроцессорных устройств РЗА и систем управления в электрических сетях. Итоги, проблемы, задачи и перспективы.

Справки по телефонам:

Заявки на участие в конференциях принимаются:

РИЦ «СРЗАУ»: 8 (8352) 226-394(5) Иванова Наталия Анатольевна
НП «СРЗАУ»: 8 (963) 787-96-05 Белотелов Алексей Константинович
8 (903) 104-49-14 Нечаева Анна Алексеевна

ina@srzau-ric.ru;
belotelov@srzau-np.ru;
nechaeva@srzau-np.ru