

Центр подготовки кадров энергетики

В.М. Машенков

**Особенности определения места повреждения
на ВЛ напряжением 110-750 кВ**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург
2005**

Машенков В.М., к.т.н. Особенности определения места повреждения на ВЛ напряжением 110-750 кВ. Издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005 г.

Рассмотрены вопросы повышения достоверности определения места повреждения (ОМП) на ВЛ 110-750 кВ для наиболее часто встречающихся однофазных к.з. с использованием фиксирующих измерительных приборов, цифровых приборов – микропроцессорных фиксирующих индикаторов, цифровых регистраторов аварийных процессов. Изложена методика количественной оценки погрешностей ОМП цифровыми приборами, вызываемых влиянием переходного сопротивления в месте к.з., нагрузки ВЛ в предаварийном режиме, погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения, наличием сложных электромагнитных связей с другими линиями. Приведены и проиллюстрированы расчетами способы учета и уменьшения влияния погрешностей на достоверность ОМП цифровыми приборами.

Учебное пособие предназначено для слушателей групп повышения квалификации Центра подготовки кадров, а также может быть использовано в практической работе оперативно-диспетчерского персонала и персонала служб РЗА ЦДУ, ОДУ, РДУ, ПЭС.

Научный редактор – начальник отдела СРЗА Ленинградского РДУ
Елецкий К.В.

1. Общие вопросы

В настоящее время в отечественной энергетике для определения мест повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ) напряжением 110 кВ и выше широко используются следующие средства измерений.

1. Фиксирующие измерительные приборы (ФИП) на полупроводниковой и микроэлектронной элементной базе типов ФИП, ЛИФП, ФПН, ФПТ, предназначенные для ОМП при КЗ на землю (однофазных и двухфазных), составляющих 85-90% всех КЗ на ВЛ. ФИП активно внедряются с начала 80-х годов и составляют основную долю (около 65%) эксплуатируемых в России средств ОМП (общим числом свыше 45 тысяч). ФИП уславливаются с 2-х сторон контролируемой линии. Фиксирующие амперметры (ФИП-А, ЛИФП-А и др.), измеряющие токи нулевой последовательности ($3I_0$), включаются в нулевой провод трансформатора тока линии. Фиксирующие вольтметры (ФИП-В, ЛИФП-В и др.), измеряющие напряжения нулевой последовательности ($3U_0$), подключаются к разомкнутому треугольнику трансформатора напряжения линии или системы шин.

2. Микропроцессорные фиксирующие индикаторы (МФИ) типов ФПМ-01, МФИ-1, МИР-1 (более ранние модели), ИМФ-ЗС, ИМФ-ЗР, МИР-З, МИР-Р, появившиеся в конце 80-х годов и нашедшие широкое применение. МФИ осуществляют ОМП при одностороннем измерении параметров аварийного режима (с одного конца ВЛ) при всех видах КЗ, с выдачей информации о виде КЗ, поврежденных фазах, расстоянии до места КЗ в км, обеспечивают получение дополнительной информации о токах и напряжениях нулевой (НП), обратной (ОП), прямой (ПП) последовательностей, фазных токах и напряжениях. Наиболее совершенные модели МФИ (ИМФ-ЗС, ИМФ-ЗР, МИР-З, МИР-Р) предназначены для ОМП в простой и сложной конфигурации сети, для параллельных магнитосвязанных ВЛ и ВЛ с ответвлениями. В настоящее время в связи с широким использованием для ОМП МФИ выпуск ФИП практически прекращен.

3. Цифровые регистраторы аварийных процессов (ЦРАП), снабженные для реализации функции ОМП прикладным программным обеспечением. Для осуществления ОМП необходима регистрация всех фазных напряжений и трех токов из набора $I_a, I_b, I_c, 3I_0$.

2. ОМП с использованием фиксирующих измерительных приборов

ОМП на основе показаний ФИП, установленных на ПС1 и ПС2 с двух концов ВЛ, при однофазных (двухфазных на землю) КЗ осуществляется на основе соотношения:

$$L_1 = \frac{3U_0^{(2)} - 3U_0^{(1)}}{3I_0^{(1)} + 3I_0^{(2)}} \cdot L + \frac{x_{0y\partial}}{3I_0^{(1)} + 3I_0^{(2)}} \quad (\text{км от ПС1}), \quad (2.1)$$

где $3I_0^{(1)}$, $3U_0^{(1)}$ - соответственно ток (кА) и напряжение (кВ) НП, измеренные на ПС1,

$3I_0^{(2)}$, $3U_0^{(2)}$ - соответственно ток (кА) и напряжение (кВ) НП, измеренные на ПС2,

L - длина линии, км,

$x_{0y\partial}$ - удельное реактивное сопротивление НП линии, Ом/км.

ОМП может быть осложнено отсутствием одного или двух показаний ФИП, наличием недостоверных показаний ФИП, вызванных неисправностью ФИП или ошибкой оперативного персонала. При использовании недостоверных показаний ФИП в программах расчета или при ручных расчетах по формуле (2.1) расчетное место повреждения (РМП) может значительно отличаться от реального места повреждения. Это приводит к увеличению времени поиска и даже к необнаружению места повреждения. Поэтому актуальным является установление критериев выявления недостоверных показаний ФИП.

1. В имеющийся на диспетчерском пункте (ДП) «Журнал для записи показаний фиксирующих приборов и определения места повреждения ВЛ» дежурный диспетчер (ДД) вносит дату, время и показания фиксирующих приборов, необходимые для ОМП, расчетное место повреждения, фактически найденное место повреждения, случаи несрабатывания приборов.

С целью выявления недостоверных показаний ФИП рекомендуем на каждом ДП иметь «Статистику ОМП» для каждой ВЛ, находящейся в оперативном управлении ДД, составленную на основе данных «Журнала для

записи» по следующей форме, приведенной в табл.2.1, к примеру для ВЛ 330 кВ
Л-379 Киришская ГРЭС(19) – ПС Чудово (49), $L = 55,1$ км, $x_{0,уд} = 1,16$ Ом/км.

Таблица 2.1

№ п/п	ВЛ	Дата, время	$3I_0$, кА	$3U_0$, кВ	$3I_0$, кА	$3U_0$, кВ	РМП, км	Факт. МП, км
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	Л-379	12.07.96 23-50	4,0	102,0	3,75	135,0	30,3	35,1
2.		21.10.96 20-28	3,36	42,4	8,4	209,6	51,6	55,1
3.		05.11.98 00-50	3,48	72,8	5,0	135,3	38,9	38,0
4.		16.12.99 06-54	3,92	89,8	5,7	134,0	36,6	37,6
5.		13.06.00 18-16	4,64	42,0	5,0	153,4	38,6	38,1
6.		14.07.00 08-30	3,92	36,2	6,2	177,2	45,8	47,6

В графах 4, 5 приведены данные для Киришской ГРЭС, в графах 6, 7 - для ПС Чудово. РМП определены по формуле (2.1) с отсчетом от Киришской ГРЭС.

Показания ФИП для каждого последующего отключения ВЛ сравниваются с показаниями ФИП при предыдущих отключениях. При достаточно близком совпадении трех показаний с одним из предыдущих отключений резко отличающееся четвертое показание может быть признано недостоверным.

2. Показания ФИП на данной ПС для каждой ВЛ должны находиться в пределах, определяемых режимами КЗ на шинах ПС1 и ПС2. Эти данные могут быть взяты из «Таблиц ОМП», имеющих на ДП и содержащих значения токов и напряжений НП начала и конца ВЛ, рассчитанные для различных точек ВЛ с дискретностью 2 км. Образец представления информации о пределах изменения показаний ФИП для нескольких ВЛ приведен в табл.2.2.

Таблица 2.2

N п/п	ВЛ	Наименование линии	Пределы измен. $3I_0$, кА $3U_0$, кВ	показ. ФИП $3I_0$,кА $3U_0$, кВ
1.	Л-352	ПС 3- ПС Чудово (49)	ПС 3 2,5-39 10-195	ПС 49 1-12 35-290
2.	Л-362	ПС Окуловская- ПС Бологое	ПС Окуловская 1,5-4 100-280	ПС Бологое 1,9-6 80-265
3.	Л-395	ПС Лоухи (87)- Князегубская ГЭС	ПС 87 1,3-3,5 60-250	КнгЭС 1,2-5,5 70-275
4.	Л-379	Киришская ГРЭС – ПС Чудово (49)	ГРЭС 19 3-32,5 20-150	ПС 49 1,5-10 45-290

Если показания ФИП, полученные ДД, не находятся в допустимых пределах, указанных в табл.2.2, они могут быть признаны недостоверными.

3. Как правило, если соотношение токов $3I_0$ по концам ВЛ $I_n / I_k \gg 1$, то не может быть $U_n / U_k \ll 1$. Если это условие не выполняется, показания $3U_0$ должны быть перепроверены.

4. Если показания фиксирующих амперметров (ФИП А) или (и) фиксирующих вольтметров (ФИП В) близки к порогу чувствительности (для ФИП А $3I_0 = 0,2-0,4$ кА, для ФИП В $3U_0 = 5-10$ кВ), то их достоверность вызывает сомнение.

Если установлено наличие недостоверных показаний, ОМП производится следующим образом:

- вместо недостоверного, используется показание ФИП для одного из предшествующих отключений данной ВЛ, близкого по остальным показаниям ФИП к данному, на основании «Статистики ОМП» для данной ВЛ;
- недостоверные показания ФИП могут быть заменены показаниями, полученными при опробовании ВЛ;
- дается задание дежурному персоналу ПС на перепроверку показаний ФИП ввиду их недостоверности;
- для расчета места повреждения используются данные проявленных осциллограмм.

При отсутствии показаний одного, а в некоторых случаях и двух ФИП, для ОМП могут быть использованы данные «Статистики ОМП», показания ФИП, полученные при опробовании ВЛ, данные осциллограмм.

В наиболее сложных случаях – при отсутствии двух показаний (ФИП А и ФИП В) с одного конца ВЛ, при наличии показания ФИП А с одного конца и ФИП В с другого конца ВЛ – недостающие показания ФИП, необходимые для определения РМП, могут быть реконструированы (восстановлены) с использованием данных ”Статистики ОМП”. Как показывает анализ этих данных, для каждой ВЛ может быть установлена зона (назовем ее достоверной зоной), за исключением участков, прилегающих к шинам обеих ПС, при КЗ внутри которой сумма показаний ФИП А и ФИП В при каждом отключении незначительно отличается от среднего значения, определенного для всего массива отключений данной ВЛ.

Форма представления данных приведена в табл.2.3 применительно к линии Л-379, для которой дана статистика отключений в табл.2.1.

Таблица 2.3

№ п/п	ВЛ	$(3I_0^{(1)} + 3I_0^{(2)})_{cp}$, кА	$(3U_0^{(1)} + 3U_0^{(2)})_{cp}$, кВ	Достоверная зона (\pm км)
1	Л-379	9,12	215,5	К+15 – Ч – 5

При определении средних значений не учтено отключение N2, сумма показаний ФИП для которого значительно отличается от средних значений, определенных по данным остальных отключений Л-379. КЗ на шинах ПС Чудово не входит в достоверную зону для Л-379.

В качестве иллюстрации возможности такого подхода к ОМП в табл.2.4,2.5 приведены для отключений Л-379 (см.табл.2.1) данные измеренных и реконструированных значений токов и напряжений НП, а также данные РМП, полученные по измеренным (см.табл.2.1) и реконструированным значениям. Для каждого отключения

$$3I_{0,рек} = (3I_0^{(1)} + 3I_0^{(2)})_{cp} - 3I_{0,изм}$$

$$3U_{0,рек} = (3U_0^{(1)} + 3U_0^{(2)})_{cp} - 3U_{0,изм}$$

Таблица 2.4

№ п/п	ВЛ	Дата, время	$3I_{0,изм}$ кА	$3U_{0,изм}$ кВ	$3I_{0,рек}$ кА	$3U_{0,рек}$ кВ	РМП, изм, км	РМП, рек, км	Факт. МП,км
1	ЛЛ-379	12.07.96 23-50	4,0	102,0	5,12	113,5	30,3	32,0	35,1
2		21.10.96 20-28	3,36	42,4	5,76	173,1	51,6	47,2	55,1
3		05.11.98 00-50	3,48	72,8	5,64	142,7	38,9	40,7	38,0
4		16.12.99 06-54	3,92	89,8	5,2	125,7	36,6	34,8	37,6
5		13.06.00 18-16	4,64	42,0	4,48	173,5	38,6	39,5	38,1
6		14.07.00 08-30	3,92	36,2	5,2	179,3	45,8	45,0	47,6

Таблица 2.5

№ п/п	ВЛ	Дата, время	$3I_{0,изм}$ кА	$3U_{0,рек}$ кВ	$3I_{0,рек}$ кА	$3U_{0,изм}$ кВ	РМП, изм, км	РМП, рек, км	Факт. МП,км
1	ЛЛ-379	12.07.96 23-50	4,0	80,5	5,12	135,0	30,3	36,6	35,1
2		21.10.96 20-28	3,36	5,9	5,76	209,6	51,6	54,1	55,1
3		05.11.98 00-50	3,48	80,2	5,64	135,3	38,9	39,3	38,0
4		16.12.99 06-54	3,92	81,5	5,2	134,0	36,6	42,1	37,6
5		13.06.00 18-16	4,64	62,1	4,48	153,4	38,6	35,7	38,1
6		14.07.00 08-30	3,92	38,3	5,2	177,2	45,8	44,6	47,6

Как видно из анализа приведенных в табл.2.4, 2.5 данных, фактически определенное место повреждения находится в допустимой зоне обхода для всех РМП, определенных по реконструируемым значениям, за исключением отключения №2 табл.2.4 (7,9, вместо 5,5 км).

3. Оценка погрешностей определения места повреждения микропроцессорными фиксирующими индикаторами и цифровыми регистраторами аварийных процессов

Достоинства и недостатки одностороннего определения места повреждения (ОМП) с использованием МФИ, (ЦРАП), в том числе рекомендации по эксплуатации, перечень возникающих методических погрешностей, достаточно полно представлены в большом числе публикаций [1-9].

МФИ (ЦРАП) осуществляют ОМП при одностороннем измерении параметров аварийного режима, используя дистанционный принцип. Как и всем устройствам, работающим на дистанционном принципе, МФИ (ЦРАП) при осуществлении ОМП присущи следующие погрешности.

1) Погрешность от используемого в алгоритмах расчета места повреждения (РМП) допущения $\beta = \arg \left[\frac{\dot{I}_0}{\dot{I}_{0к}} \right] = 0$,

где $\dot{I}_{0к}$ – вектор тока НП в месте КЗ,

\dot{I}_0 - вектор тока НП на данном конце ВЛ, в месте установки МФИ (ЦРАП), т.к. информацию о величине β нельзя получить на основе односторонних измерений (на одном конце ВЛ);

2) Погрешность от неточного задания параметров ВЛ ($x_{0y\delta}$, $x_{1y\delta}$),

где $x_{0y\delta}$ – удельное реактивное сопротивление линии нулевой последовательности,

$x_{1y\delta}$ - удельное реактивное сопротивление линии прямой последовательности;

3) Погрешность от влияния величины, нестабильности и нелинейности переходного сопротивления в зоне КЗ;

4) Погрешность от влияния нагрузки ВЛ в предаварийном режиме;

5) Погрешность от неточного учета влияния взаимной индукции с другими линиями;

б) Погрешность, вызываемая погрешностями по модулю и фазе измерительных трансформаторов тока и напряжения, к которым подключены МФИ (ЦРАП).

Поскольку при междуфазных КЗ расчет места повреждения идет по петле междуфазного КЗ (без необходимости учета влияния комплексности токораспределения в схеме НП, $x_{0y\delta}$, взаимоиндукции), то наибольшие погрешности ОМП имеют место при однофазных КЗ, и их анализу посвящен излагаемый материал.

Оценка погрешности ОМП ΔL , возникающей за счет допущения $\beta = 0$, может быть произведена следующим образом.

В соответствии с техдокументацией на приборы ИМФ-3 и МИР-3 (Р) (ЦРАП) расчет места повреждения при однофазных КЗ производится:

а) для ИМФ-3 [6] по формуле:

$$L = \frac{3}{2x_{1y\delta} + x_{0y\delta}} \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} \sin\varphi_{\phi}, \quad (3.1)$$

где U_{ϕ} – модуль напряжения поврежденной фазы в месте установки ИМФ-3,

I_{ϕ} – модуль тока поврежденной фазы в месте установки ИМФ-3,

$\varphi_{\phi} = (\dot{U}_{\phi}, \dot{I}_{\phi})$ – угол между векторами \dot{U}_{ϕ} и \dot{I}_{ϕ} .

б) для МИР-3 (Р) (ЦРАП) по формуле:

$$L = \frac{I_m \left(\dot{U}_{\phi} / \dot{I}_0 \right)}{I_m \left[\left(\dot{I}_{\phi} + \kappa \dot{I}_0 \right) Z_{1y\delta} / \dot{I}_0 \right]}, \quad (3.2)$$

где \dot{I}_0 – вектор тока НП,

$\kappa = \frac{Z_{0y\delta} - Z_{1y\delta}}{Z_{1y\delta}}$ – коэффициент компенсации по току НП,

где $Z_{0y\delta}$ – удельное сопротивление линии нулевой последовательности,

$Z_{1y\delta}$ – удельное сопротивление линии прямой последовательности.

После преобразований (3.2) можно привести к виду:

$$L = \frac{3}{\left(\frac{I_\phi}{I_0} - 1\right) x_{1y\partial} + x_{0y\partial}} \cdot \frac{U_\phi}{3I_0} \cdot \sin \varphi_0, \quad (3.3)$$

где $\varphi_0 = (\dot{U}_\phi, \dot{I}_0)$ – угол между векторами \dot{U}_ϕ и \dot{I}_0 .

С помощью программы ТКЗ-3000 (или аналогичной) при однофазных КЗ в различных точках L_k рассматриваемой ВЛ определяются параметры $U_\phi, I_\phi, 3I_0, \varphi_\phi, \varphi_0$ на шинах ПС с противоположных концов ВЛ. В зависимости от типа установленного прибора производится расчет места повреждения (РМП) для выбранных точек по формулам (3.1) или (3.3). Для примера, в табл. 3.1 и 3.2 приведен расчет для транзитной линии 330 кВ Л-362 Окуловская –Бологое, находящейся в оперативном управлении ОДУ Северо-Запада и имеющей параметры $L=94,0$ км, $x_{0y\partial} = 1,156$ Ом/км, $x_{1y\partial} = 0,32$ Ом/км. На линии Л-362 как на ПС Окуловская, так и на ПС Бологое для ОМП используются ЦРАП и ИМФ-3С.

Таблица 3.1

L_k , км от ПС Оку- ловская	U_ϕ кВ	I_ϕ кА	$3I_0$ кА	φ_ϕ	$\sin \varphi_\phi$	φ_0	$\sin \varphi_0$	L_u км	L_y км	ΔL_u км	ΔL_y км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,01	3,64	4,0	82	0,990	83	0,993	0,01	0,01	0,01	0,01
27,9	46,7	2,79	2,91	80	0,985	81	0,988	27,5	27,0	-0,4	-0,9
51,8	72,5	2,31	2,32	79	0,982	80	0,985	51,6	51,6	-0,2	-0,2
78,9	90,0	1,95	1,84	79	0,982	80	0,985	75,7	78,0	-3,2	-0,9
94,0	96,0	1,82	1,62	80	0,985	81	0,988	86,6	91,1	-7,4	-2,9

Таблица 3.2

L_k , км от ПС Бологое	U_ϕ кВ	I_ϕ кА	$3I_0$ кА	φ_ϕ	$\sin \varphi_\phi$	φ_0	$\sin \varphi_0$	L_u км	L_y км	ΔL_u км	ΔL_y км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,05	5,03	5,24	83	0,993	83	0,993	0,02	0,02	0,02	0,02
15,1	38,2	4,08	4,19	79	0,982	79	0,982	15,4	15,2	0,3	0,1
42,2	76,3	3,1	3,08	79	0,982	78	0,978	40,4	40,5	-1,8	-1,7
66,1	95,8	2,6	2,48	80	0,985	79	0,982	60,6	61,8	-5,5	-4,3
94,0	112,0	2,11	1,75	82	0,990	79	0,982	88,1	94,9	-5,9	0,9

Отклонения расчетных значений РМП, приведенных в графах 9 (для ИМФ-3С) и 10 (для ЦРАП) табл.3.1 и 3.2, от значений L_{κ} , приведенных в графе 1, соответствуют абсолютной погрешности ОМП ΔL_u (для ИМФ-3С) и ΔL_{κ} (для ЦРАП), приведенных соответственно в графах 11 и 12 таблиц. Из данных табл.3.1 и 3.2 для линии Л-362 можно сделать заключение, что все цифровые приборы ОМП ухудшают свою точность по мере удаления КЗ от места установки прибора, и точность ОМП по ЦРАП выше, чем по ИМФ-3С.

По аналогичной методике в ОДУ Северо-Запада произведена оценка точности ОМП с использованием цифровых приборов (ИМФ-3, МИР-3, ЦРАП) на всех ВЛ 330-750 кВ, находящихся в оперативном управлении ОДУ Северо-Запада. За исключением ВЛ, имеющих сложные электромагнитные связи с другими линиями и погрешность ОМП на которых определяется наличием взаимоиндукции с другими линиями, на 10 рассмотренных ВЛ, на которых установлено 20 цифровых приборов ОМП, достоверная зона ОМП (с допустимой погрешностью $\Delta L \leq 3\% L$) зависит от конфигурации сети и составляет для ЦРАП в 7 случаях – 100%, в 3 случаях – 80%, в 3 случаях – 60%, для МИР-3 в 1 случае – 100%, в 1 случае – 75%, в 1 случае – 50%, для ИМФ-3 в 3 случаях – 80%, в 1 случае – 55%.

На основе этой, хотя и не очень представительной статистики, можно сделать вывод, что введение компенсации по току НП (в ЦРАП и МИР-3) уменьшает погрешность ОМП от допущения $\beta=0$, а достоверная зона ОМП цифровыми приборами составляет 50-100%.

Для оценки достоверной зоны ОМП на ВЛ при двухсторонней установке цифровых приборов удобно результирующую информацию табл.3.1 и 3.2 представить в виде, приведенном в табл.3.3 для линии Л-362 с использованием отсчета L_{κ} только от одной из ПС (например, от ПС Окуловская) для всех приборов ОМП. В табл.3.3 в графах 2 и 3 приведены также значения погрешностей ΔL_0 и ΔL_2 , рассчитанные соответственно с использованием параметров НП $(3I_0, 3U_0, X_{0y\partial})$ и ОП $(I_2, U_2, X_{2y\partial})$, полученных для точек L_{κ} с помощью программы ТКЗ-3000, по формуле для двухсторонних измерений:

$$L_n = \frac{(U^{\kappa} - U^n) / x_{y\partial} + L \cdot I^{\kappa}}{I^n + I^{\kappa}}. \quad (3.4)$$

В (3.4) подставляются соответственно параметры НП ($3I_0, 3U_0$) или ОП (I_2, U_2) начала и конца ВЛ длиной L . Для НП $x_{y0} = x_{0y0}$ - удельное реактивное сопротивление линии нулевой последовательности, для ОП $x_{y0} = x_{2y0} = x_{1y0}$ - удельное реактивное сопротивление линии обратной последовательности.

Таблица 3.3

$L_{к}, \text{км}$ от ПС Окуловская	$\Delta L_0,$ км	$\Delta L_2,$ км	$\Delta L_u,$ км ИМФ-3 ПС Окуловская	$\Delta L_u,$ км ЦРАП ПС Окуловская	$\Delta L_u,$ км ИМФ-3 ПС Бологое	$\Delta L_u,$ км ЦРАП ПС Бологое
1	2	3	4	5	6	7
0	-1,0	-0,7	0,005	0,004	5,9	-0,9
27,9	2,2	-0,5	-0,4	-0,9	5,5	4,3
51,8	1,4	-0,2	-0,2	-0,2	1,8	1,7
78,9	-0,4	0,1	-3,2	-0,9	-0,25	-0,1
94,0	-0,84	0,5	-7,4	-2,9	-0,02	-0,02

Нахождение погрешностей L_0 в допустимой зоне свидетельствует о возникновении погрешностей L_u и L_u , в основном, за счет допущения $\beta = 0$.

По данным табл.3.3 можно:

- оценить достоверную зону ОМП на ВЛ установленными приборами;
- оценить эффективность размещения и выбора типов цифровых приборов по концам ВЛ;
- выработать рекомендации по установке новых или замене установленных приборов ОМП;
- оценить необходимость и возможность уточнения РМП с использованием метода двухсторонних измерений по составляющим НП или ОП, являющимся информативными выходными величинами цифровых приборов. Так в случае возникновения однофазного КЗ на ВЛ при нахождении показаний цифровых приборов, установленных по концам ВЛ, в достоверной зоне, но значительно отличающихся друг от друга, выбор более достоверного показания может быть осуществлен по расчету L_0 . Нахождение L_2 в допустимой зоне позволяет производить операцию уточнения РМП как при КЗ без земли, так и при однофазных (двухфазных) КЗ на землю на ВЛ при наличии взаимоиндукции с другими линиями, а также при значительном отличии фактических параметров НП ВЛ от расчетных по различным причинам (влияние неучтенных кабелей,

трубопроводов, конструкции грозотросов, сезонной нестабильности эквивалентной глубины возврата тока в земле и др.).

Особенности ОМП на одной из таких ВЛ 330 кВ Л-389 Сясь (ПС 37) – Петрозаводск (ПС90), имеющей взаимоиндукцию с несколькими ВЛ 110- 220 кВ (которая не может быть скомпенсирована из-за невозможности подключения приборов ОМП к токовым цепям этой ВЛ) и неоднородный характер изменения $x_{0уд}$ по длине ВЛ, видны из данных табл.3.4.

Таблица 3.4

$L_{к0}$, км от ПС Сясь	ΔL_0 , км	ΔL_2 , км	$\Delta L_{и3}$, км ИМФ-3 ПС 90	$\Delta L_{ц9}$, км ЦРАП ПС 90	$\Delta L_{ц37}$, км ЦРАП ПС 37	$\Delta L_{и37}$, км ИМФ-3 ПС 37
1	2	3	4	5	6	7
0	-4,8	-0,5	6,5	-32,0	0,07	0,07
74,8	-12,8	-0,3	1,4	2,5	-14,3	-12,8
124,3	-8,2	0,4	-0,3	6,9	-15,7	-16,3
168,5	-6,25	0,1	-2,7	4,4	-14,0	-22,4
227,1	-1,7	0,85	0,6	3,2	-9,0	-46,0
256,0	0,7	0,7	-0,03	-0,03	7,9	-60,0

Из трех установленных на линии Л-389 приборов ОМП (графы 4-7 табл.3.4) только ИМФ-3 (ПС 90) обеспечивает достоверное ОМП при однофазных КЗ на всей ВЛ. ЦРАП (ПС 90) имеет значительную погрешность вблизи шин ПС 37, а ЦРАП (ПС 37) имеет недопустимо большую погрешность ОМП почти по всей длине ВЛ. В графе 7 приведены расчетные данные для гипотетического ИМФ (ПС 37), из которых видно, что его установка нецелесообразна. На большей части длины линии недостоверно ОМП и по составляющим НП (графа 2). Наиболее достоверно осуществляется ОМП на этой ВЛ по составляющим ОП (графа 3) с использованием данных, получаемых на ПС 37 и ПС 90, особенно в случае ремонта или проверки ИМФ (ПС 90). Так что роль ЦРАП (ПС 37) в процедуре ОМП при однофазных КЗ заключается только в выдаче величин ОП.

Отличие на практике угла β от нуля приводит к дополнительной погрешности одностороннего метода ОМП, вызываемой наличием переходного сопротивления в месте КЗ. Произведем оценку точности определения РМП в этом случае в предположении, что переходное сопротивление является активным (R_n).

При однофазных КЗ переходное сопротивление определяется многими факторами: классом напряжения ВЛ, величиной тока КЗ и сопротивлением возникающей дуги, допустимым сопротивлением заземления опоры, условиями заземления грозозащитных тросов, сопротивлением растеканию токов НП в грунте и др.

При выборе уставок дистанционных и токовых защит расчетное значение $R_{n\text{ расч}}$ принимается для линий напряжением 110-220 кВ с заземлением грозозащитного троса на каждой опоре, а также на линиях 330 кВ, имеющих грозозащитный трос со встроенными волоконно-оптическими линиями связи, равным 5 Ом. Для других линий, при отсутствии более точных данных, принимается: для ВЛ 330-400 кВ $R_{n\text{ расч}}=14$ Ом, для ВЛ 500-750 кВ - $R_{n\text{ расч}}=20$ Ом.

Аналогично описанному выше с помощью программы ТКЗ-3000 (или аналогичной) при однофазных КЗ в различных точках L_k рассматриваемой ВЛ через выбранное переходное сопротивление определяются величины, необходимые для определения РМП и оценки погрешности ОМП. Для примера, в табл. 3.5-3.7 приведены данные для линии Л-362 (ПС Окуловская) при КЗ в тех же точках ВЛ, что и в табл.3.1, для значений переходного сопротивления, равных $R_{n\text{ расч}}=14$ Ом, $R_n=50$ Ом, $R_n=100$ Ом. Максимальная величина выбранного R_n , с одной стороны, достаточна для оценки влияния на точность ОМП, с другой стороны, не приводит к значительному уменьшению измеряемых величин (например, $3I_0$, $3U_0$, U_2 , I_2), выводящему приборы ОМП за пределы необходимой точности измерений.

$R_n = 14$ Ом Таблица 3.5

L_k , км от ПС Окулов- ская	U_ϕ кВ	I_ϕ кА	$3I_0$ кА	Φ_ϕ	$\sin \Phi_\phi$	Φ_0	$\sin \Phi_0$	L_u км	L_y км	ΔL_u км	ΔL_y км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	71,5	3,23	3,55	0	0	1	0,018	0	0,6	0	0,6
27,9	85,3	2,5	2,61	28	0,470	29	0,485	26,7	27,0	-1,2	-0,9
51,8	101,8	2,06	2,07	39	0,629	40	0,643	52,0	52,9	0,2	1,1
78,9	117,5	1,72	1,62	41	0,656	41	0,656	73,8	80,7	-5,1	1,8
94,0	125,5	1,57	1,39	40	0,643	40	0,643	86,0	90,7	-8,0	-3,3

$R_n = 50 \text{ Ом}$

Таблица 3.6

$L_{к2}$, км от ПС Окулов- ская	U_{ϕ} кВ	I_{ϕ} кА	$3I_0$ кА	φ_{ϕ}	$\sin \varphi_{\phi}$	φ_0	$\sin \varphi_0$	L_u км	$L_{ц}$ км	ΔL_u км	$\Delta L_{ц}$ км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	155,3	1,96	2,16	1	0,018	2	0,035	2,3	4,4	2,3	4,4
27,9	158,0	1,57	1,64	10	0,174	11	0,191	29,2	31,4	1,3	3,5
51,8	163,4	1,29	1,3	15	0,259	15	0,259	54,9	54,7	3,1	2,9
78,9	172,0	1,02	0,96	15	0,259	15	0,259	73,0	75,0	-5,9	-3,9
94,0	177,6	0,87	0,78	14	0,242	13	0,225	82,3	80,7	-11,7	-13,3

$R_n = 100 \text{ Ом}$

Таблица 3.7

$L_{к2}$, км от ПС Окулов- ская	U_{ϕ} кВ	I_{ϕ} кА	$3I_0$ кА	φ_{ϕ}	$\sin \varphi_{\phi}$	φ_0	$\sin \varphi_0$	L_u км	$L_{ц}$ км	ΔL_u км	$\Delta L_{ц}$ км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	182,4	1,15	1,27	1	0,018	1	0,018	4,6	4,4	4,6	4,4
27,9	183,7	0,93	0,98	5	0,087	5	0,087	28,7	28,1	0,8	0,2
51,8	186,0	0,77	0,78	8	0,139	8	0,139	56,4	56,2	4,6	4,4
78,9	190,0	0,59	0,56	9	0,156	8	0,139	84,1	76,8	5,2	-2,1
94,0	192,5	0,49	0,44	8	0,139	7	0,122	90,6	83,6	-3,4	-10,4

Таблица 3.8

$L_{к2}$, км от ПС Окулов- ская	ΔL_u , км $R_n=0$	ΔL_u , км $R_n=14 \text{ Ом}$	ΔL_u , км $R_n=50 \text{ Ом}$	ΔL_u , км $R_n=100 \text{ Ом}$	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=0$	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=14 \text{ Ом}$	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=50 \text{ Ом}$	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=100 \text{ Ом}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,005	0	2,3	4,6	0,04	0,6	4,4	4,4
27,9	-0,4	-1,2	1,3	0,8	-0,9	-0,9	3,5	0,2
51,8	-0,2	0,2	3,1	4,6	-0,2	1,1	2,9	4,4
78,9	-3,2	-5,1	-5,9	5,2	-0,9	1,8	-3,9	-2,1
94,0	-7,4	-8,0	-11,7	-3,4	-2,9	-3,3	-13,3	-10,4

Характер изменения измеряемых величин на ПС Бологое при различных R_n такой же, как на ПС Окуловская, поэтому подробный расчет погрешностей ОМП приборами, установленными на ПС Бологое, не приводится. Для удобства

анализа в табл.3.8 на основе данных табл.3.1, 3.5-3.7 приведены величины погрешностей ОМП приборами, установленными на ПС Окуловская.

В табл.3.9 приведены результаты расчета величины погрешности ОМП приборами, установленными на ПС Бологое, с отсчетом L_R от ПС Окуловская.

Таблица 3.9

$L_{к2}$, км от ПС Окулов- ская	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=0$	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=14$ Ом	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=50$ Ом	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=100$ Ом	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=0$	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=14$ Ом	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=50$ Ом	$\Delta L_{ц}$, км $R_n=100$ Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5,9	5,65	6,5	19,8	-0,9	2,5	8,0	22,1
27,9	5,5	5,35	3,3	9,7	4,3	5,0	5,1	14,7
51,8	1,8	1,65	0,4	5,5	1,7	1,5	3,8	5,4
78,9	-0,25	-0,75	-0,4	2,0	-0,1	-0,5	-0,2	-2,1
94,0	-0,02	0	-2,0	-4,0	-0,02	0	-2,0	0

Из анализа данных, приведенных в табл.3.8, 3.9, можно заключить следующее:

1.Изменение R_n в пределах 0-14 Ом не приводит к существенному увеличению погрешности ОМП, производимого как ИМФ, так и ЦРАП.

2.При $R_n=50$ Ом, несмотря на увеличение погрешности ОМП прибором ИМФ-3, установленным на ПС Окуловская, использование показаний двух приборов ИМФ-3 позволяет осуществить ОМП на всей длине ВЛ с допустимой погрешностью. При использовании показаний ЦРАП даже с двух концов ВЛ обеспечить ОМП на ВЛ с допустимой погрешностью не удастся из-за значительного роста погрешности $\Delta L_{ц}$.

3.При $R_n = 100$ Ом использование показаний ЦРАП с двух концов ВЛ позволяет осуществить ОМП почти по всей длине ВЛ с допустимой погрешностью. ОМП приборами ИМФ-3 с допустимой погрешностью невозможно даже при использовании приборов с двух концов ВЛ.

Учитывая значительную зависимость погрешностей ОМП $\Delta L_{ц}$ и $\Delta L_{ц}$ с обоих концов ВЛ и величины достоверной зоны ОМП на ВЛ от величины R_n , целесообразно при одностороннем ОМП при срабатывании цифровых приборов, кроме упомянутых выше информативных параметров, иметь также информацию о величине R_n . Как видно из данных табл. 3.5-3.7, критерием оценки величины R_n может служить величина U_{ϕ} при найденном РМП. Для линии Л-362 при $R_n = 14$

Ом $U_{\phi} = 71,5-125,5$ кВ, при $R_n=50$ Ом $U_{\phi}=155,3-177,1$ кВ, при $R_n=100$ Ом $U_{\phi}=182,4-192,5$ кВ, т.е. диапазоны изменения U_{ϕ} не перекрываются, и найденному РМП с учетом U_{ϕ} соответствует определенное R_n .

Еще более характерным индикатором повышенного значения R_n является величина φ_{ϕ} , которая может быть зафиксирована при каждом отключении ВЛ. Знание величины $R_n (U_{\phi}, \varphi_{\phi})$ позволяет либо вручную, либо автоматически ввести поправки в РМП, либо использовать ОМП по методу двухстороннего измерения по составляющим НП или ОП, т.к. РМП в этом случае не зависит от величины R_n .

Оценку погрешности ОМП при однофазных КЗ от влияния нагрузки ВЛ в предаварийном режиме можно произвести с помощью программы ТКЗ-3000 (или аналогичной) с использованием модуля «Расчет сложных повреждений» с учетом передаваемой нагрузки, рассчитываемой по «Программе расчета динамической устойчивости».

Для оценки влияния нагрузки ВЛ примерный расчет произведем для той же линии Л-362 и в тех же точках L_k . Расчет производится по формулам 3.1, 3.3 для двух режимов: 1) Передача активной мощности $P=200$ МВт от ПС Окуловская к ПС Бологое, 2) Передача той же мощности от ПС Бологое к ПС Окуловская.

Получаемые величины, необходимые для расчета, и результаты расчета РМП по показаниям ИМФ-3 (L_u) и ЦРАП (L_u), погрешностей ОМП по ИМФ-3 (ΔL_u) и по ЦРАП (ΔL_u) для первого режима для приборов, установленных на ПС Окуловская и ПС Бологое, приведены соответственно в табл.3.10 и 3.11. Поскольку характер изменения измеряемых величин для второго режима передачи мощности аналогичен первому, подробный расчет РМП и погрешностей для него не приводится. Для удобства анализа в табл.3.12 приведены результаты расчета величины погрешности ОМП приборами, установленными на ПС Окуловская и Бологое, для обоих режимов передачи мощности с отсчетом L_k от ПС Окуловская. В графах 2-5 табл.3.12 приведены данные для первого режима (направление мощности от ПС Окуловская к ПС Бологое), в графах 6-9 – для второго режима (направление мощности от ПС Бологое к ПС Окуловская).

Таблица 3.10

$L_{кз}$, км от ПС Окулов- ская	U_{ϕ} кВ	I_{ϕ} кА	$3I_0$ кА	φ_{ϕ}	$\sin \varphi_{\phi}$	φ_0	$\sin \varphi_0$	L_u км	$L_{ц}$ км	ΔL_u км	$\Delta L_{ц}$ км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,01	3,68	3,94	79	0,982	85	0,996	0,01	0,01	0,01	0,01
27,9	47,2	2,89	2,88	77	0,974	84	0,994	26,6	27,1	-1,3	-0,8
51,8	73,3	2,4	2,28	76	0,970	85	0,996	49,5	52,0	-2,3	0,2
78,9	91,0	2,05	1,80	75	0,966	85	0,996	71,8	78,5	-7,1	-0,4
94,0	97,1	1,92	1,57	76	0,970	87	0,999	82,2	91,1	-11,8	-1,7

Таблица 3.11

$L_{кз}$, км от ПС Бологое	U_{ϕ} кВ	I_{ϕ} кА	$3I_0$ кА	φ_{ϕ}	$\sin \varphi_{\phi}$	φ_0	$\sin \varphi_0$	L_u км	$L_{ц}$ км	ΔL_u км	$\Delta L_{ц}$ км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,05	4,79	5,08	81	0,988	77	0,974	0,02	0,02	0,02	0,02
15,1	36,8	3,89	4,09	82	0,990	77	0,974	15,7	15,0	0,6	-0,1
42,2	73,9	2,96	3,04	82	0,990	75	0,966	41,2	39,7	-1,0	-2,5
66,1	92,7	2,49	2,45	84	0,995	75	0,966	62,0	60,6	-4,1	-5,5
94,0	108,7	2,03	1,73	85	0,996	73	0,956	89,3	92,1	-4,7	-1,9

На основе данных табл.3.12 и из сравнения данных табл.3.12 и табл.3.3 (при $P = 0$) видно, что при наличии передаваемой мощности:

1. На передающих концах ВЛ погрешность ОМП с использованием ЦРАП несколько уменьшается, а достоверная зона ОМП остается равной 100% длины ВЛ, с использованием ИМФ-3 погрешность увеличивается, особенно на удаленной от установленных приборов половине ВЛ, сокращая достоверную зону ОМП каждым из установленных приборов.

2. На приемных концах ВЛ погрешность ОМП с использованием ЦРАП несколько увеличивается, вызывая незначительное сокращение достоверной зоны ОМП, с использованием ИМФ-3 погрешность незначительно уменьшается, практически не изменяя достоверную зону ОМП.

Таблица 3.12

$L_{к,км}$ от ПС Окулов- ская	$\Delta L_{и,}$ км ИМФ-3 ПС Окулов- ская	$\Delta L_{ц,}$ км ЦРАП ПС Окулов- ская	$\Delta L_{и,}$ км ИМФ-3 ПС Бологое	$\Delta L_{ц,}$ км ЦРАП ПС Бологое	$\Delta L_{и,}$ км ИМФ-3 ПС Окулов- ская	$\Delta L_{ц,}$ км ЦРАП ПС Окулов- ская	$\Delta L_{и,}$ км ИМФ-3 ПС Бологое	$\Delta L_{ц,}$ км ЦРАП ПС Бологое
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,01	0,01	4,7	1,9	0,01	0,01	8,8	-2,1
27,9	-1,3	-0,8	4,1	5,5	-0,3	1,3	6,5	3,5
51,8	-2,3	0,2	0,9	2,5	0,2	-1,3	2,6	1,4
78,9	-7,1	-0,4	-0,6	0,1	-2,6	-2,6	0,05	-0,2
94,0	-11,8	-1,7	-0,02	-0,02	-6,9	-5,7	-0,02	-0,02

Таким образом, расчет погрешности ОМП по предложенной методике позволяет для каждой конкретной линии определить необходимость учета влияния нагрузки ВЛ в предаварийном режиме при определении РМП при однофазных КЗ на ВЛ. Расчеты ОМП, проведенные для линии Л-362 при указанных величинах передаваемой мощности по методу двухсторонних измерений на основе составляющих НП и ОП, показали отсутствие влияния величины передаваемой мощности на точность ОМП.

4. Особенности ОМП на ВЛ, имеющих электромагнитные связи с другими линиями

При расчете места повреждения на ВЛ с использованием МФИ (ЦРАП) может быть учтено наличие взаимоиנדукции с одной из параллельных линий. Для этого в МФИ имеются входы для токов трех фаз обслуживаемой ВЛ и тока нулевой последовательности еще одной ВЛ.

Учет взаимоиנדукции в ЦРАП возможен только в том случае, если токи ВЛ, связанных взаимоиנדукцией, регистрируются одним прибором. При наличии постоянного значения взаимоиנדукции по всей длине ВЛ расчет расстояния L_p до места однофазного КЗ с учетом влияния параллельной линии выполняется по формуле [6]:

$$L_p = \frac{3}{(2 + K_{\text{вз}})x_{1y0} + x_{0y0}} \frac{U_\phi}{I_\phi} \sin \phi_\phi, \quad (4.1)$$

где $K_{\text{вз}} = \frac{x_{m.y0}}{x_{1y0}}$ - коэффициент взаимоиנדукции параллельной линии;

$x_{m.y0}$ - удельное реактивное сопротивление нулевой последовательности взаимоиנדукции.

В приборах ИМФ-3Р и ЦРАП реализовано ОМП на ВЛ, параметры взаимоиנדукции для которых неоднородны по длине линии. Максимальное количество однородных участков для описания ВЛ, в пределах которых $K_{\text{вз}} = \text{const}$, - 9.

Рассмотрим возможность использования приборов МИР-3(Р), ИМФ-3С для ОМП на ВЛ с неоднородным характером взаимоиנדукции.

Рассмотрение проведем на примере Выборгского энергоузла ОЭС Северо-Запада, фрагмент схемы которого показан на рисунке. Для ОМП на подстанции (ПС) Выборгская ПС5 на линии Л-416 установлен прибор МИР-3, на Л-474 – МИР-Р; на ПС Восточная ПС1 на линии Л-416 – фиксирующие измерительные приборы (ФИП) типа ЛИФП-2А и ЛИФП-2В, на ПС Каменногорская ПС264 на линии Л-474 – прибор ИМФ-3Р.

ПС 5

ПС 1

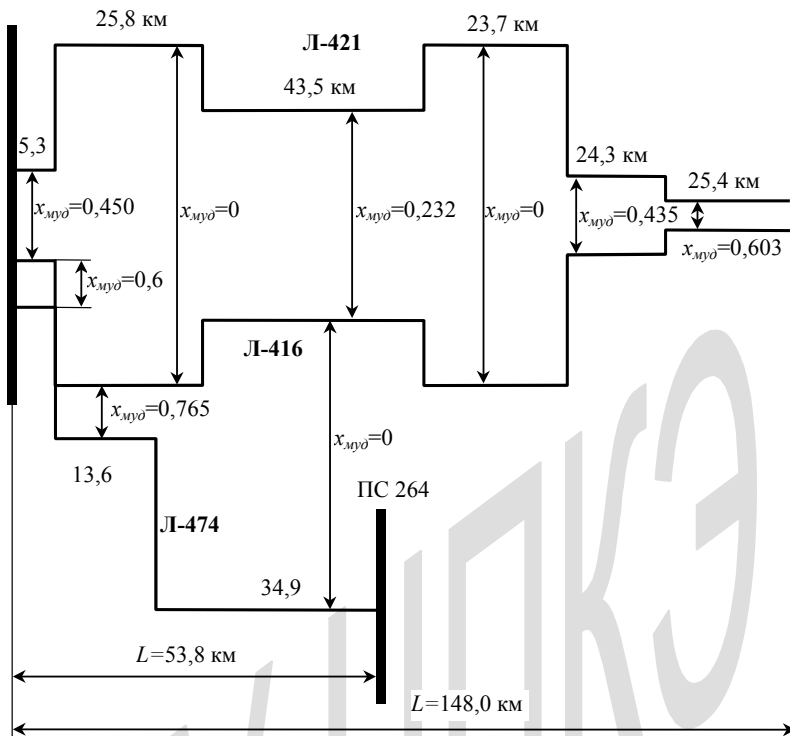


Схема фрагмента Выборгского энергоузла.

В схеме замещения ОЭС Северо-Запада, полученной посредством «Программы определения параметров ЛЭП», для каждой из указанных ВЛ имеются параметры взаимной индукции с другими линиями с разбиением ВЛ на участки, в пределах которых эти параметры постоянны. Анализ показал, что параметры взаимной индукции для всех ВЛ неоднородны по длине линии.

Параметры рассматриваемых линий следующие:

	Л-416	Л-474
L , км	148,0	53,8
x_{1y0} , Ом/км	0,322	0,317
x_{0y0} , Ом/км	1,088	1,137

Задача состоит в выборе уставки по коэффициенту взаимоиנדукции параллельной линии $K_{\text{вз.уст}}$, вводимой в МФИ. Результаты выбора $K_{\text{вз.уст}}$ для Л-416 сведены в табл. 4.1. Выбор произведен при учете взаимоиנדукции с линией Л-421 (ПС5 – ПС1) (по наибольшему влиянию). Вход индикатора МИР-3 по току $3I_0$ параллельной линии подключается в токовые цепи Л-421. Результаты выбора $K_{\text{вз.уст}}$ для линии Л-474 приведены в табл.4.2. Выбор произведен при учете взаимоиנדукции с линией Л-416. (по максимальному влиянию).

Счет участков для каждой линии осуществляется от ПС Выборгская. В графе 3 приведены расстояния L_k от ПС Выборгская до конца каждого к-го участка. В графе 4 указаны значения реактивного сопротивления нулевой последовательности взаимоиנדукции $x_{\text{м.к}}$, соответствующие концу каждого к-го участка. В графе 5 содержатся значения удельного реактивного сопротивления нулевой последовательности взаимоиנדукции $x_{\text{м.уд.к}}$ для каждого к-го участка, полученные из выражения $x_{\text{м.уд.к}} = \frac{x_{\text{м.к}}}{L_k}$. Значения коэффициента взаимоиנדукции в конце каждого к-го участка $K_{\text{вз.к}} = \frac{x_{\text{м.уд.к}}}{x_{1\text{уд}}}$ приведены в графе

6.

Таблица 4.1

Длина участка ВЛ, км	Параметры взаимоиנדукции, Ом	L_k , км	$x_{\text{м.к}}$ Ом	$x_{\text{м.уд.к}}$ Ом/км	$K_{\text{вз.к}}$	ΔL_k (км) для разных значений $K_{\text{вз.уст}}$		
						0,5	0,6	0,7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5,3	0,476+j2,38	5,3	2,383	0,45	1,398	0,8	0,7	0,6
13,6	-	18,9	2,383	0,15	0,466	-0,1	-0,4	-0,7
12,2	-	31,1	2,383	0,077	0,239	-1,4	-1,9	-2,35
43,5	4,49+j10,09	74,6	12,46	0,167	0,518	0,2	-1,0	-2,3
23,7	-	98,3	12,46	0,127	0,394	-1,8	-3,3	-4,95
24,3	3,71+j9,84	122,6	22,29	0,189	0,587	1,5	-0,25	-2,3
25,4	3,81+j15,32	148,0	37,61	0,254	0,789	7,25	4,7	2,2

Таблица 4.2

Длина участка ВЛ, км	Параметры взаимоиנדукции, Ом	$L_{к,}$ км	$x_{мк,}$ Ом	$x_{муд.к,}$ Ом/км	$K_{вз.к}$	$\Delta L_{к}$ (км) для разных значений $K_{вз.уст}$		
						1,1	1,2	1,3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
5,3	0,7+j3,25	5,3	3,25	0,613	1,934	0,66	0,57	0,49
13,6	2,04+j10,4	18,9	13,65	0,722	2,278	3,3	3,0	2,7
34,9	-	53,8	13,65	0,254	0,801	-2,4	-3,2	-3,9

Для рассматриваемых линий коэффициент $K_{вз.к}$ является переменным по длине линии, что подтверждается данными табл.4.1 и 4.2. Поэтому выбором одного значения уставки $K_{вз.уст}$, как это предусмотрено в МФИ, полной компенсации погрешности ОМП за счет учета влияния взаимоиנדукции с другими линиями не достигнуто.

Выберем коэффициент $K_{вз.уст}$ для прибора МИР-3 (МИР-Р) по условию минимизации абсолютной погрешности ОМП по длине ВЛ с учетом того, что шаг регулировки $K_{вз.уст}$ равен 0,1. Затем путем ряда итераций (изменением $K_{вз.уст}$) определим значение $K_{вз.уст}$. Выражение для относительной погрешности ОМП в конце каждого к-го участка, вызываемой отклонением выбранного $K_{вз.уст}$ от $K_{вз.к}$ (при равенстве которому отсутствовала бы методическая погрешность ОМП за счет влияния параллельной линии) имеет вид:

$$\delta L_{к} = \frac{L_{к.вз.уст} - L_{к.вз.к}}{L_{к.вз.к}} 100\% . \quad (4.2)$$

С учетом формулы (4.1) выражение (4.2) примет следующий вид:

$$\delta L_{к} = \left[\frac{(2 + K_{вз.к})x_{1yд} + x_{0yд}}{(2 + K_{вз.уст})x_{1yд} + x_{0yд}} - 1 \right] 100\% . \quad (4.3)$$

Далее определяем абсолютную погрешность ОМП в конце каждого к-го участка. Расчетные значения $\Delta L_{к}$ для разных значений коэффициента $K_{вз.уст}$ приведены в графах 7-9 табл.4.1 и 4.2. С учетом упомянутого ранее критерия выбираем для линии Л-416 коэффициент $K_{вз.уст}=0,6$; для Л-474 – $K_{вз.уст} = 1,2$.

При выбранных значениях $K_{вз.уст}$ абсолютная погрешность ОМП от влияния взаимоиנדукции минимизирована по длине линии и для

рассматриваемых ВЛ значительно меньше зоны обхода ВЛ (для Л-416 – 15 км, для Л-474 – 11 км). Неучитывание взаимоиндукций с другими линиями (кроме одной) может вызывать для рассматриваемых ВЛ дополнительную погрешность ОМП.

Для уточнения результатов ОМП, полученных посредством МФИ на линиях с взаимоиндукцией, и корректировки (при необходимости) введенной установки $K_{вз.уст}$ можно использовать метод двухстороннего измерения по аварийным параметрам токов и напряжений нулевой (НП) и обратной последовательности (ОП), измеряемым ФИП (НП), МФИ и ЦРАП (НП и ОП).

Возможность использования параметров НП (ОП) можно оценить следующим образом. С помощью программы ТКЗ-3000 (или аналогичной) при однофазных КЗ в различных точках рассматриваемой линии (для удобства сравнения погрешностей можно в тех же точках, что и в табл.4.1 и 4.2) определяются параметры НП ($3I_0$, $3U_0$) и ОП (I_2 , U_2) на шинах ПС с противоположных концов ВЛ. Производим расчет места повреждения (РМП) для выбранных точек по параметрам НП (ОП). Для линий Л-416 и Л-474 результаты расчета приведены в табл.4.3 и 4.4.

Таблица 4.3

Л _{кз} , км	ПС5				ПС1				НП		ОП	
	$3I_0$, кА	$3U_0$, кВ	I_2 , кА	U_2 , кВ	$3I_0$, кА	$3U_0$, кВ	I_2 , кА	U_2 , кВ	РМП, км	ΔL , км	РМП, км	ΔL , км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5,3	11,1	86,4	2,64	71,8	0,71	8,8	1,26	18,2	2,8	-2,5	5,1	-0,2
18,9	7,8	60,1	1,88	52,4	1,46	11,0	1,19	14,6	18,5	-0,4	19,1	+0,2
31,1	6,1	48,3	1,48	42,5	1,97	13,1	1,18	12,9	32,0	+0,9	31,1	0
74,6	3,6	29,3	0,86	28,4	3,77	23,2	1,56	12,3	74,7	+0,1	74,8	+0,2
98,3	2,8	25,8	0,7	27,0	5,87	34,6	2,16	14,9	101,2	+2,9	98,7	+0,4
122,6	2,25	23,0	0,53	27,9	9,67	62,6	3,42	21,1	123,1	+0,5	122,8	+0,2
148,0	0,81	17,8	0,21	49,4	31,7	241	10,4	58,0	150,6	+2,6	147,6	-0,4

Отклонения расчетных значений РМП (приведенных в графах 10 и 12, табл.4.3) от значений в графе 1, обуславливают абсолютные погрешности ОМП ΔL за счет результирующего влияния взаимоиндукции магнитосвязанных линий, значения которых даны в графах 11 и 13 соответственно для НП и ОП. Из табл.4.3 следует, что для линии Л-416 с целью уточнения ОМП, произведенного по показаниям МИР-3 на ПС 5, может быть использован РМП по составляющим

НП, измеренным прибором МИР-3 на ПС 5 и ЛИФП на ПС 1. При этом максимальная погрешность ОМП не превышает 2,9 км.

Таблица 4.4

Л-474	ПС5				ПС264				НП		ОП	
	$L_{кв}$, км	$3I_0$, кА	$3U_0$, кВ	I_2 , кА	U_2 , кВ	$3I_0$, кА	$3U_0$, кВ	I_2 , кА	U_2 , кВ	РМП, км	ΔL , км	РМП, км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
5,3	10,6	85,3	2,87	71,4	0,90	99,3	0,97	61,4	5,25	-0,1	5,4	+0,1
18,9	7,3	58,4	2,06	52,6	1,77	164	0,93	55,0	20,7	+1,8	19,3	+0,4
36,0	5,1	42,7	1,47	39,1	2,2	233	0,92	51,0	39,3	+3,3	36,4	+0,4
53,8	3,7	33,5	1,13	31,5	2,6	297	0,96	50,9	58,6	+4,8	54,0	+0,2

Из табл.4.4 следует, что для линии Л-474 уточнение ОМП по составляющим НП неприемлемо из-за большой погрешности (до 4,8 км). Необходимо осуществлять РМП по составляющим ОП, измеряемым приборами МИР-Р и ИМФ-3Р. При этом влияние взаимной индукции на точность ОМП практически отсутствует.

Обеспечение высокой достоверности ОМП на ВЛ, имеющих сложные электромагнитные связи с другими линиями, с использованием составляющих ОП, снимаемых с МФИ (ЦРАП), иллюстрируются данными табл.4.5 для линии Л-473 ПС Выборгская ПС5 – Северо-Западная ТЭЦ, имеющей взаимную индукцию с несколькими линиями Выборгского энергоузла.

Таблица 4.5

$L_{кв}$, км от ПС5	ΔL_0 , км	ΔL_2 , км	ΔL , км МИР-3, ПС5	ΔL , км ЦРАП, С-3 ТЭЦ
0	11,6	0,23	0	16,5
27,2	7,3	0,4	0,2	7,8
71,1	0,7	0,3	-2,8	1,3
109,8	-5,8	0,6	-12,0	-0,3
129,5	-2,8	0	-11,6	-0,02

Как видно из данных табл.4.5, ни показания МИР-3 и ЦРАП, ни ОМП по составляющим НП не обеспечивают достоверного определения РМП по всей длине ВЛ.

5. Учет влияния погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения при ОМП с использованием метода двухсторонних измерений

Наличие погрешностей измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) искажает информацию, снимаемую с их вторичных обмоток, – значения первичных токов и напряжений ВЛ. Поскольку приборы определения места повреждения (ОМП) на ВЛ подключаются к вторичным цепям ТТ и ТН, может возникнуть погрешность при ОМП. Для анализа влияния погрешностей ТТ и ТН на точность ОМП на ВЛ необходимо решить следующие задачи:

- получить аналитические выражения, связывающие электрические величины, подводимые к приборам ОМП, с фазными токами ТТ и фазными напряжениями ТН;
- преобразовать указанные выражения с учетом как токовых погрешностей, так и погрешностей напряжения поврежденной и неповрежденных фаз ТТ и ТН;
- оценить влияние погрешностей ТТ и ТН на точность ОМП по всей длине ВЛ с использованием метода расчета места повреждения в заданных точках ВЛ с помощью программы ТКЗ-3000 (или другой аналогичной).

В результате анализа должны быть получены сравнительные данные о влиянии на точность ОМП различных используемых методов и типов приборов, что позволит оптимизировать их применение. Имея эти данные, дежурный диспетчер в случае возникновения КЗ (после проведения расчета места повреждения) сможет уточнить зону обхода.

Для определения места повреждения на ВЛ при часто встречающихся однофазных КЗ рассмотрим применение метода двухстороннего измерения аварийных токов и напряжений нулевой (НП) и обратной (ОП) последовательностей, осуществляемого фиксирующими измерительными приборами (ФИП)-НП, микропроцессорными фиксирующими индикаторами (МФИ) и цифровыми регистраторами аварийных процессов (ЦРАП)-НП и ОП. Использование метода двухсторонних измерений посредством МФИ и ЦРАП позволяет повысить точность ОМП за счет исключения погрешностей, присущих методу односторонних измерений.

Для оценки влияния погрешностей ТТ и ТН на точность ОМП получим выражения, связывающие симметричные составляющие токов и напряжений в месте установки приборов для ОМП с фазными токами и напряжениями. На основе метода симметричных составляющих при КЗ в любой точке ВЛ на землю одной фазы, например фазы А, эти выражения будут иметь вид:

$$3I_0 = I_a + |\dot{I}_b + \dot{I}_c|, \quad (5.1)$$

$$3U_0 = |\dot{U}_b + \dot{U}_c| - U_a, \quad (5.2)$$

$$I_2 = I_a - I_1 - I_0 = \frac{2}{3} \frac{I_2}{I_1 + I_2} I_a - \frac{1}{3} \frac{I_2}{I_1 + I_2} |\dot{I}_b + \dot{I}_c|. \quad (5.3)$$

Для практических расчетов с высокой степенью точности $I_2 \approx I_1$, и выражение (5.3) примет другой вид

$$I_2 = \frac{1}{3} I_a - \frac{1}{6} |\dot{I}_b + \dot{I}_c|, \quad (5.4)$$

$$U_2 = U_1 - U_a - U_0 = \frac{2}{3} \frac{U_2}{U_1 - U_2} U_a + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1 - U_2} |\dot{U}_b + \dot{U}_c|. \quad (5.5)$$

Для анализа влияния погрешностей ТТ и ТН удобно представить формулу (3.4) в другой форме:

$$L_n = L_{u,i} + L_i = \frac{(U_\kappa - U_n) / x_{y\partial}}{I_n + I_\kappa} + \frac{LI_\kappa}{I_n + I_\kappa}. \quad (5.6)$$

При расчете места повреждения составляющая $L_{u,i}$ зависит как от напряжений, так и токов, а также от погрешности ТТ и ТН, составляющая L_i – только от токов и погрешности ТТ. При анализе будем учитывать только токовые погрешности f_i и погрешности напряжения f_u . Угловыми погрешностями ТТ и ТН из-за их малого влияния на модули фазных токов и напряжений с высокой степенью точности можно пренебречь.

Как видно из выражения (5.6), влияние токовых погрешностей ТТ удобнее оценивать по максимальному $3I_{0f}^+$, I_{2f}^+ и минимальному $3I_{0f}^-$, I_{2f}^- значениям токов I_n и I_κ , получаемым при наличии погрешностей того или иного знака.

Выражение для тока $3I_{0f}$ с учетом токовой погрешности f_i на основании формулы (5.1) будет иметь вид:

$$3I_{0f} = \left(1 + \frac{f_{ia}}{100}\right)I_a + \left(1 + \frac{f_{ib}}{100}\right)|\dot{I}_b + \dot{I}_c|,$$

где f_{ia} – токовая погрешность ТТ поврежденной фазы А при токе I_a , соответствующем однофазному КЗ в выбранной точке ВЛ, %; $f_{ib}=f_{ic}$ – токовая погрешность ТТ неповрежденных фаз В и С при токах $I_b \approx I_c$, соответствующих однофазному КЗ в выбранной точке ВЛ, %.

Для удобства расчета модуль суммы векторов $|\dot{I}_b + \dot{I}_c|$ заменяем равным ему выражением $(3I_0 - I_a)$ и получаем:

$$3I_{0f} = \left(1 + \frac{f_{ia}}{100}\right)I_a + \left(1 + \frac{f_{ib}}{100}\right)(3I_0 - I_a). \quad (5.7)$$

В большинстве случаев составляющей тока $3I_{0f}$, определяемой погрешностями $f_{ib}=f_{ic}$, можно пренебречь, и выражение (5.7) примет другой вид:

$$3I_{0f} = \left(1 + \frac{f_{ia}}{100}\right)I_a + (3I_0 - I_a). \quad (5.8)$$

На основании изложенного, а также с учетом токовой погрешности f_i и формулы (5.3) представим симметричную составляющую тока обратной последовательности

$$I_{2f} = \frac{2}{3} \frac{I_2}{I_1 + I_2} \left(1 + \frac{f_{ia}}{100}\right)I_a - \frac{1}{3} \frac{I_2}{I_1 + I_2} \left(1 + \frac{f_{ib}}{100}\right)(3I_0 - I_a). \quad (5.9)$$

Если $I_2 \approx I_1$, тогда на основании выражения (5.4) получим:

$$I_{2f} = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{f_{ia}}{100}\right)I_a - \frac{1}{6} \left(1 + \frac{f_{ib}}{100}\right)(3I_0 - I_a). \quad (5.10)$$

По аналогии с выражением (5.8) и на основании формулы (5.3) симметричная составляющая тока обратной последовательности примет вид:

$$I_{2f} = \frac{2}{3} \frac{I_2}{I_1 + I_2} \left(1 + \frac{f_{ia}}{100} \right) I_a - \frac{1}{3} \frac{I_2}{I_1 + I_2} (3I_0 - I_a). \quad (5.11)$$

По аналогии с выражением (5.8) на основании (5.4) преобразуем симметричную составляющую тока

$$I_{2f} = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{f_{ia}}{100} \right) I_a - \frac{1}{6} (3I_0 - I_a). \quad (5.12)$$

Влияние погрешности напряжения f_u на значение составляющей $L_{u,i}$ учитывается путем оценки приращений $\Delta(3U_0)_f = (3U_0)_f - 3U_0$ и $\Delta U_{2f} = U_{2f} - U_2$. На основании выражения (5.2) получим погрешность напряжения

$$\Delta(3U_0)_f = \frac{f_{ub}}{100} |\dot{U}_b + \dot{U}_c| - \frac{f_{ua}}{100} U_a,$$

где f_{ua} – погрешность напряжения ТН поврежденной фазы А при напряжении U_a , %; $f_{ub} = f_{uc}$ – погрешности напряжения ТН неповрежденных фаз В и С при $U_b \cong U_c$, %.

Погрешность напряжения с учетом условия $|\dot{U}_b + \dot{U}_c| = 3U_0 + U_a$ можно преобразовать:

$$\Delta(3U_0)_f = \frac{f_{ub}}{100} (3U_0 + U_a) - \frac{f_{ua}}{100} U_a. \quad (5.13)$$

На основании выражения (5.5) получим погрешность напряжения

$$\Delta U_{2f} = \frac{2}{3} \frac{U_2}{U_1 - U_2} \frac{f_{ua}}{100} U_a + \frac{1}{3} \frac{U_2}{U_1 - U_2} \frac{f_{ub}}{100} (3U_0 + U_a). \quad (5.14)$$

Для примера оценим влияние погрешностей ТТ и ТН на расчет места повреждения с использованием полученных аналитических выражений для двух ВЛ 330 кВ, находящихся в оперативном управлении ОДУ Северо-Запада, параметры которых приведены в табл. 5.1.

С помощью программы ТКЗ-3000 (или другой аналогичной) определяются параметры нулевой и обратной последовательностей, а также значения $I_a, I_b, I_c, I_1, U_a, U_b, U_c, U_1$ при однофазных КЗ в произвольных, но более-

менее равномерно распределенных точках рассматриваемых линий, на шинах ПС с противоположных концов ВЛ.

Таблица 5.1

Параметры		ВЛ 330 кВ	
		Ленинградская (ПС3) – Чудово (ПС49), Л-352	Сясь (ПС37) – Петрозаводск (ПС90), Л-389
Длина линии L , км		89,6	256
Удельное реактивное сопротивление линии двух последовательностей, Ом/км. .	нулевой $x_{0уд}$	1,176	1,274
	обратной $x_{2уд}$	0,315	0,315

Влияние погрешностей ТТ и ТН оценим с учетом формулы (5.6) по значению абсолютной погрешности (км) в конце каждого участка

$$\Delta L_k = \Delta L_{u,i} + \Delta L_i = (L_{u,i,f} - L_{u,i}) + (L_{i,f} - L_i), \quad (5.15)$$

где $L_{u,i,f}$ и $L_{i,f}$ рассчитываются с использованием составляющих тока $3I_{0f}(I_{2f})$ и напряжения $(3U_{0f})(U_{2f})$.

Результаты расчета составляющих тока нулевой последовательности $3I_{0f}$ для линии Л-352 приведены в табл. 5.2.

При расчете было учтено, что на ПС Ленинградская приборы ОМП (ФИП, ЦРАП) подключены к ТТ класса точности 0,5, на ПС Чудово – к ТТ класса точности 0,2, номинальный первичный ток $I_{ном} = 2000$ А. При оценке погрешностей f_{ia} , f_{ib} принимаем:

расчетный ток КЗ на ВЛ не превышает номинальной предельной кратности, установленной для используемых ТТ (ГОСТ 7746-2001 «Трансформаторы тока. Общие технические условия»), и следовательно, полная погрешность ТТ составляет $\varepsilon \leq 10\%$;

сопротивление вторичной цепи, в которую включены приборы ОМП, установлено ГОСТ 7746-2001.

Таблица 5.2

Длина участка L_k , км	Токи, кА			Токовые погрешности, %		Составляющая тока с учетом токовой погрешности $3I_{0f}$, кА
	$3I_0$	I_a	I_b	f_{ia}	f_{ib}	
0	38,7/1,28	37,0/2,89	0,83/0,8	-9,0/-1,0	$\pm 0,68/\pm 0,3$	35,3/1,26
6,0	23,0/2,1	22,2/2,89	0,43/0,4	-9,0/-1,0	$\pm 0,75/\pm 0,35$	21,0/2,07
20,0	11,7/3,0	11,4/3,18	0,12/0,06	-9,0/-1,0	$\pm 1,5/\pm 0,75$	10,6/2,97
40,0	6,7/4,08	6,8/3,92	0,05/0,1	-9,0/-3,0	$\pm 1,6/\pm 0,75$	6,09/3,97
66,0	4,13/6,31	4,56/5,81	0,22/0,26	-5,0/-5,0	$\pm 1,2/\pm 0,62$	3,9/6,02
89,6	2,72/11,4	3,71/10,4	0,5/0,54	-5,0/-9,0	$\pm 0,73/\pm 0,35$	2,53/10,5
Примечание. В числителе приведены данные для ПС3, в знаменателе – ПС49.						

Погрешности f_{ia} , f_{ib} для конкретных значений токов I_a , $I_b=I_c$ можно выбирать согласно имеющейся на объекте эксплуатационной документации на ТТ (если в ней указаны зависимости погрешностей от первичного тока) или по метрологическим характеристикам, приведенным в ГОСТ 7746-2001. Для первичных токов в пределах 5 – 120 % $I_{ном}$ токовые погрешности f_{ib} выбираются (по ГОСТ 7746-2001) равными пределу допустимой токовой погрешности для конкретных значений токов. При этом погрешности ТТ для токов, отличных от указанных в ГОСТ, находятся методом интерполяции при условии, что они не должны выходить за пределы ломаных линий, состоящих из отрезков, проведенных через точки допустимых погрешностей.

При выборе погрешности f_{ia} ТТ поврежденной фазы при первичных токах $I_1 \geq 3I_{ном}$ принимаем отрицательное значение $f_{ia} = -9,0\%$, составляющее примерно 90 % максимальной полной погрешности $\varepsilon = 10\%$. В табл.5.2 приводятся также значения погрешностей f_{ia} с учетом класса точности ТТ для первичных токов $1,2I_{ном} < I_1 < 3I_{ном}$, расчетные значения $3I_{0f}$ согласно формуле (5.8) при условии $3I_{0f}^+ \approx 3I_{0f}^- \approx 3I_{0f}$. При этом токи неповрежденной фазы С не указываются, так как с высокой степенью точности $I_b=I_c$. По формуле (5.7) для ПС3 и ПС49 рассчитаны значения $3I_{0f}^+$ и $3I_{0f}^-$ в зависимости от знака погрешности f_{ib} .

Результаты расчета погрешности напряжения $\Delta(3U_0)_f$ для линии Л-352 представлены в табл.5.3. Расчет выполнен по формуле (5.13) при использовании

для определения места повреждения ФИП, которые подключаются к дополнительным обмоткам ТН, соединенным по схеме разомкнутого треугольника и имеющим класс точности 3,0 или 3Р.

Таблица 5.3

Длина участка L_k , км	Напряжения, кВ			Погрешности напряжения, %		Абсолютная погрешность напряжения $\Delta(3U_0)_f$, кВ
	$3U_0$	U_a	U_b	f_{ua}	f_{ub}	
0	188/35,6	2,05/123	200/192	$\pm 6,0/\pm 3,0$	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 5,83/\pm 8,44$
6,0	112/55,7	82,2/132	201/198	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 8,28/\pm 9,59$
20,0	56,5/78,5	140/133	202/204	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 10,08/\pm 10,34$
40,0	32,3/106	164/122	202/209	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 10,81/\pm 10,49$
66,0	19,6/164	175/87,0	201/215	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 11,06/\pm 10,14$
89,6	12,4/297	176/0,59	200/229	$\pm 3,0/\pm 6,0$	$\pm 3,0/\pm 3,0$	$\pm 10,91/\pm 8,95$
Примечание. В числителе приведены данные для ПСЗ, в знаменателе – ПС49.						

Поскольку $U_b \approx U_c$, в табл. 5.3 приведены только значения фазного напряжения U_b .

Погрешности f_{ua} , f_{ub} для конкретных значений напряжений U_a , $U_b = U_c$ можно также выбирать по имеющейся на объекте эксплуатационной документации на ТН (если в ней указаны зависимости погрешностей от первичного напряжения) или по метрологическим характеристикам, установленным ГОСТ 1983-2001 «Трансформаторы напряжения. Общие технические условия».

Для класса точности 3,0 (3Р) ГОСТ 1983-2001 устанавливает предел допустимой погрешности напряжения $f_u = \pm 3,0$ % при первичном напряжении $(0,05 - 1,2) U_{1ном}$ (для ВЛ 330 кВ равном фазному номинальному напряжению 190 кВ) и $f_u = \pm 6,0$ % при $U_1 < 0,05 U_{1ном}$.

Чтобы оценить максимальное влияние погрешностей ТН, значения f_{ua} и f_{ub} выбираются равными пределу допустимой погрешности напряжения и разными по знаку.

В табл. 5.4 приведены результаты расчета погрешности напряжения $\Delta(3U_0)_f$ при ОМП по симметричным составляющим нулевой последовательности с использованием ЦРАП, установленных на ПС3 (Ленинградская) и ПС49 (Чудово) и подключенных к ТН класса точности 0,5.

Таблица 5.4

Длина участка L_k , км	Напряжения, кВ			Погрешности напряжения, %		Абсолютная погрешность напряжения $\Delta(3U_0)_f$, кВ
	$3U_0$	U_a	U_b	f_{ua}	f_{ub}	
0	188/35,6	2,05/123	200/192	$\pm 6,0/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 1,07/\pm 2,02$
6,0	112/55,7	82,2/132	201/198	$\pm 1,0/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 1,79/\pm 2,26$
20,0	56,5/78,5	140/133	202/204	$\pm 1,0/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 2,38/\pm 2,39$
40,0	32,3/106	164/122	202/209	$\pm 0,5/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 1,8/\pm 2,36$
66,0	19,6/164	175/87,0	201/215	$\pm 0,5/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 1,84/\pm 2,12$
89,6	12,4/297	176/0,59	200/229	$\pm 0,5/\pm 6,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 1,82/\pm 1,52$

Примечание. В числителе приведены данные для ПС3, в знаменателе – ПС49.

Для ТН класса точности 0,5 в соответствии с ГОСТ 1983-2001 при $U_1 = (0,8 - 1,2)U_{1ном}$ предел допустимой погрешности напряжения f_{ua} составляет $\pm 0,5$ %. Примем следующее:

U_1	$f_{ua}, \%$
$0,4 - 0,8 U_{1ном}$	± 1
$0,05 - 0,4 U_{1ном}$	± 3
$0,05 U_{1ном}$	± 6

В табл. 5.5 на основании формулы (5.15) и данных табл. 5.2 – 5.4 сведены результаты расчета (км) погрешностей ОМП для ФИП (в числителе) и ЦРАП (в знаменателе). Значения $L_{u,if}^+$ и $L_{u,if}^-$ различаются знаками абсолютной погрешности $\Delta(3U_0)_f$.

Представляет интерес также оценка влияния погрешностей измерительных ТТ и ТН при ОМП на ВЛ с взаимоиנדукцией или

неравномерным изменением x_{0y0} по длине линии, поскольку для повышения достоверности ОМП с использованием МФИ (ЦРАП) можно применять метод двухстороннего измерения по аварийным параметрам токов и напряжений обратной последовательности. Результаты расчета составляющей тока обратной последовательности I_{2f} для линии Л-352 приведены в табл.5.6. Расчет произведен по формуле (5.12) при условии $I_1 \cong I_2$.

Таблица 5.5

Длина участка L_k	Токовые составляющие РМП		Токовая погрешность РМП ΔL_i	Составляющие РМП, зависящие от токов и напряжений			Погрешность РМП от тока и напряжения $\Delta L_{u,i}$	Максимальная абсолютная погрешность ΔL_k
	L_i	$L_{i,f}$		$L_{u,i}$	$L_{u,i,f}^+$	$L_{u,i,f}^-$		
0	2,86	3,09	0,23	-3,24	-3,21/-3,47	-3,87/-3,62	-0,63/-0,38	-0,4/-0,15
6,0	7,48	8,04	0,56	-1,9	-1,41/-1,92	-2,72/-2,22	-0,82/-0,32	1,1/0,54
20,0	18,4	19,6	1,2	1,28	2,66/1,7	-0,1/1,08	1,38/0,4	2,63/1,7
40,0	33,9	35,3	1,4	5,83	8,05/6,6	4,45/5,9	2,22/0,8	3,62/2,2
66,0	54,2	54,4	0,2	11,47	14,2/13	10,55/12	2,45/1,0	2,7/1,22
89,6	72,4	72,3	-0,1	17,07	19,9/19	$\pm 1,82/18$	2,79/1,7	2,67/1,6

Таблица 5.6.

Длина участка L_k , км	Токи, кА			Токовые погрешности, %		Ток обратной последовательности с учетом погрешности ТГ I_{2f} , кА
	I_2	I_a	I_b	f_{ia}	f_{ib}	
0	12,1/1,27	37,0/2,89	0,83/0,8	-9,0/-1,0	$\pm 0,68/\pm 0,3$	11,0/1,22
6,0	7,24/1,14	22,2/2,89	0,43/0,4	-9,0/-1,0	$\pm 0,75/\pm 0,35$	6,58/1,09
20,0	3,76/1,13	11,4/3,18	0,12/0,06	-9,0/-1,0	$\pm 1,5/\pm 0,75$	3,42/1,08
40,0	2,28/1,32	6,8/3,92	0,05/0,1	-9,0/-3,0	$\pm 1,6/\pm 0,75$	2,08/1,24
66,0	1,58/1,89	4,56/5,81	0,22/0,26	-5,0/-5,0	$\pm 1,2/\pm 0,62$	1,52/1,76
89,6	1,39/3,32	3,71/10,4	0,5/0,54	-5,0/-9,0	$\pm 0,73/\pm 0,35$	1,34/2,97

Примечание. В числителе приведены данные для ПС3, в знаменателе – ПС49.

Результаты расчета абсолютной погрешности напряжения ΔU_{2f} для линии Л-352, выполненного по формуле (5.14), сведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Длина участка L_k , км	Напряжения, кВ			Погрешности напряжения, %		Абсолютная погрешность напряжения ΔU_{2f} , кВ
	U_2	U_a	U_1	f_{ua} %	f_{ub} %	
0	69,4/33,7	2,05/123	134/168	$\pm 6,0/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 0,43/\pm 0,27$
6,0	42,1/25,8	82,2/132	161/176	$\pm 1,0/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 0,31/\pm 0,21$
20,0	22,5/21,4	140/133	181/181	$\pm 1,0/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 0,18/\pm 0,17$
40,0	14,4/22,5	164/122	189/180	$\pm 0,5/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 0,07/\pm 0,17$
66,0	11,2/30,2	175/87,0	192/172	$\pm 0,5/\pm 1,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 0,06/\pm 0,21$
89,6	11,9/51,3	176/0,59	192/151	$\pm 0,5/\pm 6,0$	$\pm 0,5/\pm 0,5$	$\pm 0,06/\pm 0,27$

Примечание. В числителе приведены данные для ПС3, в знаменателе – ПС49.

На основании формулы (5.15) и данных табл.5.6, 5.7 выполнен расчет погрешностей ОМП (км), результаты которого приведены в табл.5.8. В табл.5.9 для упрощения для линии Л-389 указаны только результаты расчета погрешностей ОМП (км) по показаниям ФИП и ЦРАП (МФИ). На ПС Сясь и ПС Петрозаводск токовые цепи приборов ОМП подключены к ТТ класса точности 0,5, цепи напряжения – к ТН класса точности 3,0 (ФИП) и 0,5 (ЦРАП, МФИ).

Таблица 5.8

Длина участка L_k	L_i	$L_{i,f}$	ΔL_i	$L_{u,i}$	$L^+_{u,i,f}$	$L^-_{u,i,f}$	$\Delta L_{u,i}$	Максимальная абсолютная погрешность ΔL_k
0	8,55	8,98	0,43	-8,49	-9,12	-9,46	-0,97	-0,54
6,0	12,2	12,7	0,5	-6,18	-6,54	-6,96	-0,78	-0,28
20,0	20,7	21,5	0,8	-0,7	-0,51	-1,0	0,19	0,99
40,0	32,9	33,5	0,6	7,12	7,95	7,48	0,83	1,43
66,0	48,8	48,1	-0,7	17,35	18,64	18,12	1,29	0,59
89,6	63,2	61,8	-1,4	25,56	29,27	28,8	2,7	1,3

Таблица 5.9

Длина участка L_k	ФИП			ЦРАП ($3I_0, 3U_0$)			ЦРАП (I_2, U_2)		
	ΔL_i	$\Delta L_{u,i}$	ΔL_k	ΔL_i	$\Delta L_{u,i}$	ΔL_k	ΔL_i	$\Delta L_{u,i}$	ΔL_k
0	1,13	-5,75	-4,62	1,13	-3,8	-2,67	3,46	-1,77	1,69
74,8	2,82	3,47	6,29	2,82	0,58	3,4	2,97	1,03	4,0
124,3	0,85	4,16	5,01	0,85	0,98	1,83	0,96	1,04	2,0
168,5	-0,9	-4,14	-5,04	-0,9	-0,83	-1,73	-0,86	-0,67	-1,53
227,1	-1,8	-2,78	-4,58	-1,8	-0,33	-2,13	-2,64	0,22	-2,42
256	-0,5	3,83	3,33	-0,5	1,6	1,1	-2,9	4,0	1,1

Как видно из данных табл.5.9, ΔL_k по показаниям ФИП превосходят ΔL_k по показаниям ЦРАП ($3I_0, 3U_0$) за счет значительно большей величины $\Delta L_{u,i}$, вызываемой более низким классом точности ТН.

Проведенная оценка погрешностей при ОМП на примере двух ВЛ показывает, что наибольшие погрешности возникают при использовании ФИП (достигают 0,25 принятой зоны обхода) за счет большего влияния погрешностей ТН на составляющую $\Delta L_{u,i}$.

Влияние погрешности при использовании ЦРАП (МФИ) в 1,5 – 2 раза меньше, чем в случае применения ФИП.

При использовании ЦРАП (МФИ) погрешности ОМП по параметрам нулевой последовательности могут быть либо несколько больше, чем по параметрам обратной последовательности (например, для линии Л-352 примерно в 1,5 раза больше), либо эти погрешности примерно равны (как для линии Л-389).

Имея значения абсолютной погрешности ОМП в конце каждого участка ΔL_k , диспетчер может уточнить зону обхода ВЛ. Например, для линии Л-352 при использовании для ОМП приборов ФИП (табл.5.5) и расчетном месте повреждения 40 км от ПС Ленинградская зона обхода может быть уточнена на ± 4 км.

6. Учет влияния погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения при ОМП с использованием односторонних измерений

Оценку влияния погрешностей измерительных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) на точность ОМП микропроцессорными приборами при однофазных КЗ на ВЛ проведем на основании используемого в ИМФ-3 алгоритма определения РМП в соответствии с выражением (3.1). Такой подход правомерен и в отношении МИР-3 и ЦРАП, т.к. введение в алгоритм их работы компенсации по току НП практически не влияет на оценку влияния погрешностей измерительных трансформаторов.

На основании (3.1) выражение для определения РМП (L_{kf}) с учетом погрешности измерительных трансформаторов, например, для поврежденной фазы А примет вид:

$$L_{kf} = \frac{3}{2X_{1y\partial} + X_{0y\partial}} \frac{U_a(1+f_{ua}/100)}{I_a(1+f_{ia}/100)} \sin(\varphi_a + \Delta\varphi_a), \quad (6.1)$$

где $f_{ua}(\%)$ – погрешность напряжения ТН поврежденной фазы А при напряжении U_a ;

$f_{ia}(\%)$ – токовая погрешность ТТ поврежденной фазы А при токе I_a , соответствующем однофазному КЗ в выбранной точке ВЛ.

$\Delta\varphi_a = \delta_u + \delta_i$ - алгебраическая сумма угловых погрешностей δ_u ТН (при напряжении U_a) и δ_i ТТ (при токе I_a).

Оценку погрешности ОМП $\Delta L_{kf} = L_{kf} - L_k$, с учетом погрешностей измерительных трансформаторов, можно произвести путем определения необходимых величин для различных точек L_k рассматриваемой ВЛ с помощью программы ТКЗ-3000 (или аналогичной). Для примера, в табл.6.1,6.2, соответственно для приборов, установленных на ПС Окуловская и ПС Бологое приведены результаты расчета для линии Л-362. При расчете учтено, что на ПС Окуловская и ПС Бологое цифровые приборы ОМП подключены к ТТ и ТН класса точности 0,5.

Таблица 6.1

$L_{к}$, км от ПС Окулов- ская	U_a кВ	I_a кА	φ_a град	f_{ia} %	f_{ia} %	$\Delta\varphi_a$ град	$\sin \alpha$	L_{kf}^+ км	L_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,01	3,64	82	$\pm 6,0$	-5,0	2,5 -5,5	0,995 0,972	0,01	0,01	0,01	0,01
27,9	46,7	2,79	80	$\pm 3,0$	$\pm 1,0$	$\pm 3,0$	0,990 0,964	28,8	26,1	0,9	-1,8
51,8	72,5	2,31	79	$\pm 3,0$	$\pm 0,5$	$\pm 2,5$	0,989 0,972	53,8	49,7	2,0	-1,8
78,9	90,0	1,95	79	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	0,985 0,978	77,0	74,3	-1,9	-4,6
94,0	96,0	1,82	80	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	0,989 0,961	88,2	85,1	-5,8	-8,9

Таблица 6.2

$L_{к}$, км от ПС Бологое	U_a кВ	I_a кА	φ_a град	f_{ia} %	f_{ia} %	$\Delta\varphi_a$ град	$\sin \alpha$	L_{kf}^+ км	L_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0,05	5,03	83	$\pm 6,0$	-5,0	2,5 -5,5	0,997 0,976	0,02	0,02	0,02	0,02
15,1	38,2	4,08	79	$\pm 3,0$	-5,0	0,5 -3,5	0,983 0,968	16,7	15,5	1,6	0,4
42,2	76,3	3,1	79	$\pm 1,0$	-3,0	$\pm 1,7$	0,987 0,976	42,3	41,0	0,1	-1,2
66,1	95,8	2,6	80	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,7$	0,989 0,979	62,2	58,8	-3,9	-7,3
94,0	112	2,11	82	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	0,993 0,987	89,6	86,5	-4,4	-7,5

В графе 5 табл.6.1,6.2 для конкретных величин U_a приведены значения f_{ia} , которые выбраны для ТН класса точности 0,5 так же, как и в разделе 5. В графе 6 табл.6.1,6,2 для конкретных величин I_a приведены значения f_{ia} , которые выбраны для ТТ класса точности 0,5 так же, как и в разделе 5.

При расчете $\Delta\varphi_a$ (графа 7 табл.6.1,6.2) значения δ_u выбираются при $U_1 = 0,8-1,2 U_{1н}$ в соответствии с ГОСТ 1983-2001 равными пределу допустимой угловой погрешности $\delta_u = \pm 20$ мин. При других напряжениях (в соответствии с изменением f_{ua}) - при $U_1 = 0,4-0,8 U_{1н}$ $\delta_u = \pm 40$ мин, при $U_1 = 0,05-0,4 U_{1н}$ $\delta_u = \pm 120$ мин, при $U_1 < 0,05 U_{1н}$ $\delta_u = \pm 240$ мин. Значения δ_i выбираются для первичных токов в пределах 5-120% $I_{1н}$ в соответствии с ГОСТ 7746-2001 при $I_1 = 1,0-1,2 I_{1н}$ $\delta_i = \pm 30$ мин, при $I_1 = 1,0-0,2 I_{1н}$ $\delta_i = \pm 30 \pm 45$ мин, при $I_1 = 0,2-0,05 I_{1н}$ $\delta_i = \pm 45 - \pm 90$ мин. При токах, больших 120% $I_{1н}$, δ_i увеличивается с ростом f_{ia} и выбирается при $f_{ia} = \pm 1,0\%$ равной ± 60 мин, а в соответствии с «треугольником погрешностей» ТТ [10] при $f_{ia} \geq 3,0\%$, $\delta_i = \pm 60$ мин, при $f_{ia} = -5,0\%$ $\delta_i = \pm 90$ мин, при $f_{ia} = -9,0\%$, $\delta_i = \pm 150$ мин.

В графе 8 табл.6.1,6.2 приведены значения $\sin\alpha = \sin(\varphi_a + \Delta\varphi_a)$, соответствующие сумме положительных и отрицательных погрешностей δ_u и δ_i .

В графе 9 табл.6.1,6.2 приведены значения L_{kf}^+ , рассчитанные при положительных величинах δ_u , отрицательных величинах δ_i и максимальных значениях $\sin\alpha$. В графе 10 табл.6.1,6.2 приведены значения L_{kf}^- , рассчитанные при отрицательных величинах δ_u , положительных (если это имеет место) величинах δ_i и минимальных значениях $\sin\alpha$. Поэтому значения ΔL_{kf}^+ и ΔL_{kf}^- определяют диапазон погрешностей ОМП в каждой точке L_k при наиболее неблагоприятном сочетании знаков δ_u и δ_i .

Из сравнения величин погрешностей, приведенных в графах 11, 12 табл.6.1, 6.2 и в графе 11 табл.3.1, 3.2, видно, что при ОМП цифровыми приборами, установленными на ПС Окуловская и ПС Бологое, несмотря на некоторое увеличение погрешностей ОМП за счет влияния погрешностей измерительных трансформаторов (особенно это относится к ΔL_{kf}^-), достоверная зона ОМП (с допустимой погрешностью $\Delta L \leq 3\% L$) уменьшается незначительно, главным образом, за счет увеличения погрешностей ОМП на удаленном конце

ВЛ. Относительный вес в общей погрешности ΔL_{kf} составляющих, возникающих за счет влияния погрешностей по модулю ТН и ТТ, определяется величиной f_{ua} и f_{ia} , а составляющая, возникающая за счет угловых погрешностей ТН и ТТ, соизмерима по величине с этими двумя составляющими ввиду значительной величины углов φ_a и значений $\sin \alpha$, близких к 1,0.

Представляет интерес оценить влияние погрешностей ТТ и ТН на точность ОМП цифровыми приборами при значениях переходного сопротивления R_n , в месте КЗ, отличных от нуля, т.к., как это видно из табл.3.5-3.7, углы φ_a значительно уменьшаются с ростом R_n и, следовательно, угловые погрешности ТТ и ТН могут оказывать большее влияние на точность ОМП.

В табл. 6.3-6.5 приведены результаты расчета погрешностей ΔL_{kf} для линии Л-362 приборами, установленными на ПС Окуловская, с использованием величин, приведенных в табл.3.5-3.7 для $R_n = 14 - 100$ Ом.

Таблица 6.3 $R_n = 14$ Ом

$L_{кз}$, км от ПС Окулов- ская	U_a кВ	I_a кА	φ_a град	f_{ua} %	f_{ia} %	$\Delta\varphi_a$ град	$\sin \alpha$	L_{kf}^+ км	L_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	71,5	3,23	0	$\pm 3,0$	-3,0	$\pm 3,0$	$\pm 0,05$	2,05	-1,95	2,05	-1,95
27,9	85,3	2,5	28	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	$\pm 1,7$	0,495 0,444	28,75	24,8	0,85	-3,1
51,8	101,8	2,06	39	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	0,645 0,613	54,05	49,9	2,25	-1,9
78,9	117,5	1,72	41	$\pm 1,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,2$	0,672 0,640	78,0	72,05	-0,8	-6,85
94,0	125,5	1,57	40	$\pm 1,0$	$\pm 0,6$	$\pm 1,3$	0,660 0,625	89,75	82,2	-4,25	-11,8

Таблица 6.4 $R_n = 50 \text{ Ом}$

$L_{кз,км}$ от ПС Окулов- ская	U_a кВ	I_a кА	φ_a град	f_{ua} %	f_{ia} %	$\Delta\varphi_a$ град	$\sin \alpha$	L_{kf}^+ км	L_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	155,3	1,96	1	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$	0,03 0,003	4,25	0,4	4,25	0,4
27,9	158,0	1,57	10	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,9$	0,189 0,158	32,15	26,3	4,25	-1,6
51,8	163,4	1,29	15	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,9$	0,274 0,244	58,75	51,1	6,95	-0,7
78,9	172,0	1,02	15	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	0,275 0,243	78,4	67,8	-0,5	-11,1
94,0	177,6	0,87	14	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	0,256 0,225	89,1	75,6	-4,9	-18,4

Таблица 6.5 $R_n = 100 \text{ Ом}$

$L_{кз,км}$ от ПС Окулов- ская	U_a кВ	I_a кА	φ_a град	f_{ua} %	f_{ia} %	$\Delta\varphi_a$ град	$\sin \alpha$	L_{kf}^+ км	L_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	182,4	1,15	1	$\pm 0,5$	$\pm 0,65$	$\pm 0,95$	0,034 0,0	9,1	0	9,1	0
27,9	183,7	0,93	5	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	0,105 0,070	34,75	22,7	6,85	-5,2
51,8	186,0	0,77	8	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	0,156 0,122	63,3	48,8	11,5	-3,0
78,9	190,0	0,59	9	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,0$	0,174 0,139	78,4	67,8	15,6	-4,9
94,0	192,5	0,49	8	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 1,4$	0,164 0,115	107,7	73,7	13,7	-20,3

Поскольку расчет погрешности ΔL_{kf} для линии Л-362 приборами, установленными на ПС Бологое, выполняется аналогичным образом, то, для краткости, в табл.6.6 для приборов, установленных на ПС Бологое, приводятся только полученные в результате расчета величины ΔL_{kf} для различных значений

R_n с учетом L_k от ПС Окуловская. В графах 2,3 приведены значения ΔL_{kf} для $R_n=14$ Ом, в графах 4,5 – для $R_n=50$ Ом, в графах 6,7 – для $R_n=100$ Ом. В табл.6.6 в графах 8-11 приведены также значения погрешностей ΔL_{0f} и ΔL_{2f} , рассчитанные с использованием параметров НП ($3I_0, 3U_0, X_{0yd}$) и ОП (U_2, I_2, X_{2yd}), полученных для точек L_k с помощью программы ТКЗ-3000, по формулам 5.8,5.12-5.14. В графах 8, 10 приведены значения для $R_n=0$, в графах 9, 11 – для $R_n=100$ Ом.

Таблица 6.6

L_k , км от ПС Окулов- ская	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км	ΔL_{kf}^+ км	ΔL_{kf}^- км	ΔL_{0f} км	ΔL_{0f} км	ΔL_{2f} км	ΔL_{2f} км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	2,8	8,5	1,2	11,4	10,6	28,7	-0,3	-3,1	-1,75	-1,5
27,9	3,2	7,5	-0,4	6,8	2,7	16,5	2,4	4,3	-1,5	-1,5
51,8	-0,6	3,8	-1,5	3,9	0,3	10,7	1,4	-0,6	-2,9	-1,1
78,9	-1,2	-0,01	-2,4	1,6	-2,2	6,1	-3,7	-2,4	-1,9	-0,9
94,0	0,5	1,25	-3,7	-0,3	-0,35	7,5	-1,5	-3,0	-0,9	0,9

На основании данных табл.6.3-6.6 можно сделать следующие выводы:

1. При изменении R_n в пределах 0-14 Ом не происходит значительного изменения погрешности ОМП ΔL_{kf} за счет влияния погрешностей ТН и ТТ, и достоверная зона ОМП сокращается незначительно (на основании сравнения данных табл.6.3 и 6.1; табл.6.6, графы 2, 3 и табл.6.2).

2. При увеличении R_n до 50 и 100 Ом при некотором уменьшении составляющих погрешности ΔL_{kf} , вызываемых погрешностями ТН и ТТ по модулю, результирующая погрешность ΔL_{kf} увеличивается за счет большего влияния угловых погрешностей $\Delta \varphi_a$ ТН и ТТ из-за уменьшения величины φ_a .

При этом сами величины $\Delta \varphi_a$ примерно равны при R_n , равных 50 и 100 Ом, и меньше, чем при $R_n=14$ Ом, за счет увеличения напряжения U_a и уменьшения тока I_a . Как видно из данных табл.6.4, 6.5 (графы 11, 12) и табл.6.6 (графы 4-7), с учетом того, что погрешности ОМП могут принимать значения как

ΔL_{kf}^+ , так и ΔL_{kf}^- , погрешность ОМП при $R_n = 50$ Ом и при $R_n = 100$ Ом выше допустимого значения ($\Delta L \leq 3\% L$) на всей длине ВЛ.

3. Как видно из данных табл.6.6 (графы 8-11), погрешность ОМП при двухстороннем методе измерений как по составляющим НП, так и ОП, с учетом погрешностей измерительных ТН и ТТ, находится в допустимых пределах при изменении R_n от 0 до 100 Ом. Поэтому при идентификации однофазного КЗ с большим значением R_n (по величине U_{ϕ} , ϕ_{ϕ}), ОМП целесообразно производить по двухстороннему методу измерений.

Список литературы

1. Арцишевский Я.Л. Определение мест повреждения линий электро-передачи в сетях с заземленной нейтралью.-М: Высшая школа, 1988.
2. Белотелов А.К. и др. Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи. Электричество, N12, 1997.
3. Аржанников Е.А. и др. Совершенствование приборов одностороннего ОМП на ВЛ. Электрические станции, N3, 1998.
4. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи.-М:НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 1998.
5. Белотелов А.К. и др. Фиксирующие индикаторы серии ИМФ для ОМП в электрических сетях 6-750 кВ. Электрические станции, N5, 1998.
6. Кузнецов А.П., Лукоянов В.Ю. Фиксирующие индикаторы для определения мест повреждений на воздушных линиях электропередачи.-М:"Издательство НЦ ЭНАС", 2001.
7. Дунаев А.И. О новой технологии определения места повреждения. Энергетик, N2, 2001.
8. Мякушин М.Ю., Попов М.Г. Определение мест коротких замыканий на линиях высокого напряжения. Энергетик, N10, 2002.
9. Сухоручкин И.В. Опыт наладки, применения и эксплуатации фиксирующих индикаторов в Ставропольэнерго. Электрические станции, N8, 2002.
10. Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. -М: НТФ"Энергопрогресс", "Энергетик", 1998.

Содержание

1. Общие вопросы	3
2. ОМП с использованием фиксирующих измерительных приборов	4
3. Оценка погрешностей определения места повреждения микропроцессорными фиксирующими индикаторами и цифровыми регистраторами аварийных процессов	9
4. Особенности ОМП на ВЛ, имеющих электромагнитные связи с другими линиями	21
5. Учет влияния погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения при ОМП с использованием метода двухсторонних измерений	27
6. Учет влияния погрешностей измерительных трансформаторов тока и напряжения при ОМП с использованием односторонних измерений	38
Список литературы	45

В.М. Машенков

**Особенности определения места повреждения
на ВЛ напряжением 110-750 кВ**

Учебное пособие

Издание Центра подготовки кадров энергетики
194223, Санкт-Петербург, а/я 44
Тираж 1000 экз., 2005 г.